Machine Translated by Google

Revue des sciences de la terre 122 (2013) 10–37

Listes de contenu disponibles sur SciVerse ScienceDirect

Avis sur les sciences de la terre

page d'accueil du journal : www.elsevier.com/locate/earscirev

Questions de recherche actuelles liées au ruissellement après un incendie de forêt et processus d'érosion

Moody a, , Richard A. Shakesby John A. [b], Peter R. Robichaud [c], Susan H. Cannon [d], Déborah A. Martin [un]

[un] Programme national de recherche, US Geological Survey, Boulder, CO, États-Unis
[b] Département de géographie, Faculté des sciences, Université de Swansea, Pays de Galles, Royaume-Uni
[c] Station de recherche des Rocheuses, Département de l'agriculture des États-Unis, Service des forêts, Moscou, ID, États-Unis
[d] Programme sur les risques de glissement de terrain, US Geological Survey, Golden, CO, États-Unis

Informations sur l'article

Historique de l'article :
Reçu le 11 avril 2012
Accepté le 11 mars 2013
Disponible en ligne le 27 mars 2013

Mots clés :
Incendie de forêt
Gravité de la brûlure
Précipitations à méso-échelle
Propriétés hydrauliques du sol
Ruissellement
Érosion des sols

abstrait

Les recherches sur les effets post-incendies de forêt ont commencé aux États-Unis il y a plus de 70 ans et ne se sont étendues que plus tard à d'autres parties du monde. Les réponses post-incendie sont généralement transitoires, épisodiques, variables dans l'espace et dans le temps, dépendent de seuils et impliquent de multiples processus mesurés par différentes méthodes. Ces caractéristiques tendent à entraver les progrès de la recherche, mais la vaste base de connaissances empiriques accumulée dans différentes régions du monde suggère qu'il devrait maintenant être possible de synthétiser les données et d'apporter une amélioration substantielle la compréhension de la réponse au ruissellement et à l'érosion après un incendie de forêt. Il est donc important d'identifier et de hiérarchiser les questions de recherche liées au ruissellement et à l'érosion après les incendies de forêt. Les questions de recherche prioritaires sont la nécessité de : (1) organiser et synthétiser les similitudes et les différences dans les réponses post-incendies de forêt entre les différentes régions sujettes aux incendies du monde afin de déterminer des modèles communs et des généralités qui peuvent expliquer les relations de cause à effet ; (2) identifier et quantifier les relations fonctionnelles entre les mesures des effets du feu et les propriétés hydrauliques du sol qui représentera mieux les conditions dynamiques et transitoires après un incendie de forêt ; (3) déterminer l'interaction entre les paysages brûlés et les précipitations à méso-échelle temporellement et spatialement variables, qui sont souvent les principal facteur de ruissellement et de réponses à l'érosion après un incendie de forêt ; (4) déterminer les relations fonctionnelles entre les précipitations, la morphologie du bassin, la connectivité du ruissellement, la zone contributive, la rugosité de la surface, le stockage dans la dépression et le sol caractéristiques requises pour prédire le moment, l'ampleur et la durée des inondations et des coulées de débris provenant de zones non vieillies bassins brûlés; et (5) développer des méthodes de mesure standard qui assureront la collecte de données uniformes et données comparables sur le ruissellement et l'érosion. La résolution de ces problèmes contribuera à améliorer les concepts et les outils informatiques. modèles de processus de ruissellement et d'érosion après un incendie de forêt.

Publié par Elsevier BV

Contenu

1. Introduction 11
2. Cadre d'organisation des réponses au ruissellement et à l'érosion après un incendie de forêt. 12
2.1. Régimes de feu 12
2.2. Régimes de précipitations. 12
2.3. Régime hydro-géomorphique. 13
2.4. Domaines de réponse post-incendie 13
3. Précipitations : problématiques de recherche liées à la variabilité temporelle et spatiale des précipitations à méso-échelle. 13
3.1. Contexte 13
3.2. Variations temporelles des précipitations. 14
3.3. Variations spatiales des précipitations. 15
3.4. Priorités de recherche futures. 16
4. Infiltration : quantification des propriétés du sol et des effets hydrauliques 4.1. Contexte. 17
4.2. Gravité des brûlures et propriétés hydrauliques du sol. 19
4.3. Modification des théories traditionnelles d'infiltration 4.4. Mesures des propriétés hydrauliques des sols. 20

Auteur correspondant. Tél. : +1 303 541 3011.
Adresses électroniques : jamoody@usgs.gov (JA Moody), rashakesby@swansea.ac.uk (RA Shakesby), probichaud@fs.fed.us (RP Robichaud), cannon@usgs.gov (Canon SH), damartin@usgs.gov (DA Martin).

0012-8252/$ – voir page de garde. Publié par Elsevier BV
http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.03.004

Machine Translated by Google

4.5. Problème de dépendance temporelle 21
4.6. Orientations futures de recherche. 21
5. Ruissellement : relier les précipitations et la morphologie du bassin à la réponse post-incendie. 21
5.1. Contexte . 21
5.2. Facteurs affectant le ruissellement après un incendie de forêt 22
5.2.1. Seuils critiques. 22
5.2.2. Zone contributive 22
5.2.3. Stockage en dépression et rugosité de surface. 23
5.2.4 Connectivité des zones de production d'eau de ruissellement 23
5.3. L'importance des propriétés géomorphiques. 24
5.4. Orientations futures de recherche 24
6. Érosion et transport des sols et des sédiments. 24
6.1. Contexte . 24
6.1.1. Effritement sec 25
6.1.2. Érosion par gouttes de pluie, ruissellement et érosion inter-rigoles 25
6.1.3. Érosion en rigoles 26
6.1.4. Glissements de terrain et ruptures de pente. 26
6.1.5. Drainage, chenal et érosion par coulées de débris 26
6.2. Disponibilité des sédiments . 27
6.3. Mesures de l'érosion et du transport après un incendie de forêt 27
6.4. Causes des différences de processus entre les domaines après un incendie de forêt 28
6.5. Orientations futures de la recherche 29
7. Résumé . 29
Remerciements. 30
Références 30

1. Introduction

Le nombre et la gravité des incendies de forêt aux États-Unis et dans
Les changements climatiques dans d'autres régions du monde sont devenus une préoccupation majeure
au cours des dernières décennies. Cela découle en partie des impacts et des préoccupations de second ordre
sur le stockage du carbone, la qualité de l'eau et la perturbation des écosystèmes, mais
principalement en raison de préoccupations liées à l'augmentation de la population dans ou à proximité
zones sujettes aux incendies de forêt où le ruissellement et l'érosion après l'incendie ont été renforcés
peut entraîner des dommages catastrophiques et des pertes de vies humaines en raison d'inondations destructrices
et les coulées de débris (Neary et Gottfried, 2002 ; Pausas et al., 2008).
Les interventions post-incendie ont tendance à être disproportionnées par rapport aux
à la taille du bassin brûlé. Par exemple, les débits de pointe peuvent être aussi
pouvant atteindre 300 m3 s−1 km−2 (Brown, 1972; Moody et Martin, 2001a;
Gartner et al., 2004 ; Moody et al., 2008a ; Smith et al., 2011a), qui est
comparable et dans certains cas supérieur aux précipitations maximales–
inondations par ruissellement dans des conditions non brûlées (Costa, 1987).
Les impacts du changement climatique sur les déclenchements et le comportement des feux de forêt ont
fait l'objet de recherches actives depuis un certain temps (Flannigan et al., 2000;
Westerling et al., 2003; Bachelet et al., 2007; Littell et al., 2009; Moritz
et al., 2010 ; Westerling et al., 2011), mais les implications pour
le ruissellement et l'érosion après les incendies de forêt ne sont explorés que maintenant (Pierce
et Meyer, 2008; Moody et Martin, 2009a; Goode et al., 2012).

Des progrès continus dans la compréhension et la prévision des conséquences post-incendies
Les processus de ruissellement et d'érosion sont entravés par un certain nombre de limitations.
Premièrement, les réponses des zones brûlées sont transitoires et durent souvent moins
plus de 7 ans, en fonction de divers facteurs, notamment la vitesse de reprise de la végétation,
les conditions météorologiques après l'incendie, la disponibilité des sédiments,
et la morphologie du bassin (Rowe et al., 1954 ; Cerdà, 1998a ; Moody et
Martin, 2001b; Gartner et al., 2004; Shakesby et al., 2007; Sheridan
et al., 2007; Cannon et al., 2010). Une telle réponse transitoire limite la
durée de la fenêtre de recherche (Moody et Martin, 2009b) afin que
la plupart des études se concentrent sur les premières années suivant un incendie de forêt, limitant
l'acquisition de données suffisantes pour établir la signification statistique
des relations physiques observées. Deuxièmement, les réponses de grande ampleur
ont tendance à être épisodiques et destructrices avec des échelles de temps relativement courtes
minutes à quelques heures, ce qui rend la collecte de données sur le terrain difficile. Troisièmement, la
la réponse peut dépendre de la séquence d'orages de différentes intensités
magnitudes (Germanoski et al., 2002 ; Moody et al., 2008a) rendant les données
interprétation compliquée. De plus, les bassins complètement brûlés sont
souvent relativement petites (de quelques hectares à quelques dizaines de km2 ; Gartner
et al., 2004) et imbriquées dans des bassins régionaux beaucoup plus vastes.
ils peuvent être affectés par des effets à méso-échelle (~1–104 km2), de courte durée et
précipitations spatialement variables. De telles cellules de précipitations sont fréquemment
intégrées dans des modèles de précipitations régionales à plus grande échelle. À ce jour,
les caractéristiques de ces tempêtes ont été beaucoup moins prévisibles que
celles des précipitations régionales à plus grande échelle et de plus longue durée. Quatrièmement,
le ruissellement et l'érosion des pentes récemment brûlées ne conduisent pas toujours
à des inondations importantes ou à des événements d'érosion majeurs tels que des coulées de débris, soit
en raison de précipitations insuffisantes ou de conditions géomorphologiques limitantes (Cannon
et al., 2001a, 2003; Larsen, 2003; Pausas et al., 2008; Robichaud et al.,
2008a; Cannon et al., 2010). Le ruissellement et l'érosion sont instables (variables
dans le temps) et des processus non uniformes (variables dans l'espace), de sorte que les processus existants
théories et méthodes développées pour des écoulements stables et uniformes répondant
pour obtenir une précipitation stable et uniforme, il faut d'abord la modifier (Candela et al.,
2005; Moody et Martin, 2009b). Cinquièmement, les caractéristiques hydrologiques et géomorphologiques
les processus sont généralement non linéaires et donc contrôlés par de nombreux seuils physiques
(tels que l'infiltration, l'écoulement de surface excessif et le flux de débris)
initiation), qui ajoutent à la complexité. Et enfin, les enquêtes ont
été confondu par une multiplicité de méthodes et d'échelles de mesure,
rendant difficiles les comparaisons entre les études (Shakesby et Doerr,
(2006; Moody et Martin, 2009a).

Un spectre de conditions hydrologiques et sédimentologiques post-incendies de forêt
des réponses allant de l'absence de réponse à des inondations catastrophiques, des catastrophes mortelles
des coulées de débris et une sédimentation dommageable ont été documentées dans
de nombreux endroits différents à travers le monde (Rowe et al., 1954;
Brown, 1972; Helvey, 1980; Scott et van Wyk, 1992; Shakesby
et al., 1993; Cerda, 1998a; Prosser et Williams, 1998; Condéra
et al., 2003; Nishimune et al., 2003; Coelho et al., 2004; Lane et al.,
2006; Tomkins et al., 2008; Silins et al., 2009; Cerdà et Robichaud,
2009 ; Dunkerley et al., 2009 ; Shin, 2010 ; Shakesby, 2011), et a
ont fourni une multitude de données empiriques. Quelques-unes de ces études sur le terrain s'efforcent
pour comprendre et prédire les processus sous-jacents, mais la plupart ont
non (Larsen et al., 2009, p. 1394). L'incapacité à prédire avec précision
réponses post-incendie de forêt compte tenu de toutes les différentes conditions telles que les
caractéristiques des précipitations, les propriétés du sol et la morphologie du bassin (comme
résumé, par exemple, par Shakesby et Doerr, 2006 ; Pausas et al., 2008 ;
Moody et Martin (2009a) soulignent la nécessité d'organiser ces données empiriques en fonction
des similitudes pour permettre une meilleure compréhension.
des processus post-incendie. Une meilleure compréhension des processus
conduira à une amélioration des capacités prédictives des modèles post-incendies de forêt.

Machine Translated by Google

L'objectif de cette revue est donc double : premièrement, proposer un cadre d'organisation pour aider à synthétiser les données en identifiant les modèles communs et les généralités qui aideront à découvrir les raisons physiques des différences de réponses, et deuxièmement, identifier les questions de recherche prioritaires dont la résolution fera progresser notre compréhension des quatre principaux processus (précipitations, infiltration, ruissellement et érosion et transport des sols et des sédiments) contrôlant les réponses au ruissellement et à l'érosion après un feu de forêt.

2. Cadre d'organisation des réponses au ruissellement et à l'érosion après un incendie de forêt

Nous proposons un cadre organisationnel qui regroupe d'abord la vaste gamme de réponses hydrologiques et géomorphiques post-incendies de forêt en domaines de réponse post-incendies de forêt. Ces domaines sont conceptuellement composés d'un régime d'incendie, d'un régime de précipitations et d'un régime hydro-géomorphique avec des gammes globalement similaires de mesures quantifiables. L'objectif ultime est d'organiser et de synthétiser la vaste quantité de données empiriques provenant de différents domaines post-incendies de forêt afin de mieux comprendre chaque processus, les raisons des différences de réponse et de prédire spécifiquement, aussi près que possible du temps réel, la réponse du ruissellement et de l'érosion après de nouveaux incendies de forêt dans n'importe quel domaine post-incendie de forêt.

2.1. Régimes d'incendie

Les régimes d'incendie sont dérivés des caractéristiques et des effets du comportement des incendies (Agee, 1993 ; Neary et al., 2005). Les caractéristiques comprennent les distributions temporelles (c'est-à-dire l'intervalle de récurrence et la durée de l'incendie), la distribution spatiale (c'est-à-dire la zone affectée et le schéma) et le comportement (c'est-à-dire le type d'incendie, le processus de combustion et le type de végétation) (Neary et al., 2005 ; Krebs et al., 2010). Les facteurs dominants du comportement des incendies varient selon les différentes échelles temporelles et spatiales (Whitlock et al., 2010a). Les effets sont le plus souvent évalués en relation avec les conséquences écologiques (c'est-à-dire la mortalité de la végétation et la gravité des incendies) et socio-économiques (c'est-à-dire les coûts et les dommages aux biens) (Krebs et al., 2010), mais on s'est peu intéressé aux conséquences hydrologiques et sédimentologiques. La plupart des régimes d'incendies ont été décrits de manière semi-quantitative en utilisant une mesure quantitative de l'intervalle entre les incendies (ou bien la fréquence des incendies, l'intervalle de récurrence des incendies ou la rotation des incendies), mais uniquement une description qualitative de l'intensité des incendies (Heinselman, 1981) ou de la gravité des incendies (Hardy et al., 1998 ; Brown, 2000 ; Keeley, 2009). Pour une zone générale donnée, les intervalles entre les incendies peuvent être estimés en utilisant l'approche « arbre individuel », l'approche « composite » (Baker et Ehle, 2001) ou une fonction de la zone (statistiques fréquence-zone, Malamud et al., 2005).

Pour un cadre organisationnel de réponse post-incendie, il est important d'identifier les caractéristiques et les effets des régimes d'incendie qui affectent le plus directement les réponses hydrologiques et sédimentologiques et qui sont facilement disponibles dans le monde entier. L'intensité d'un incendie représente l'énergie libérée au-dessus du sol et n'est pas une bonne mesure de la quantité de chaleur transmise au sol (Neary et al., 2005). La gravité des brûlures fait généralement référence aux effets écologiques au-dessus et au-dessous du sol (Neary et al., 2005). La gravité des brûlures affecte l'infiltration, le ruissellement et l'érosion, est inégale et n'est malheureusement pas facilement disponible dans le monde entier. La « profondeur de brûlure » est une mesure qui reflète la consommation de litière, d'humus et de matériaux ligneux au-dessus du sol, qui obstruent l'écoulement de surface (Ryan, 2002) ; il s'agit cependant d'une mesure qualitative. Il a été démontré que la température du sol a des effets directs sur les transformations et les pertes chimiques (Giovannini et Lucchesi, 1983 ; Giovannini et al., 1988), la destruction de la matière organique, la mortalité des graines et des plantes, la perte d'eau (Ryan, 2002) et l'érodibilité du sol (Moody et al., 2005). La température du sol serait une mesure quantifiable idéale ; cependant, les mesures quantitatives directes de la température du sol sont presque impossibles à réaliser pendant les feux de forêt, contrairement aux feux dirigés (Bento-Gonçalves et al., 2012), et donc, les chercheurs ont eu recours à des mesures qualitatives indirectes telles que la profondeur de la brûlure et des indicateurs visuels de la gravité de la brûlure du sol (Parsons et al., 2010). Les réponses ont été liées aux intervalles de récurrence des incendies (Swanson, 1981; Loomis et al., 2003; Shakesby et Doerr, 2006), et les intervalles de récurrence des incendies sont facilement disponibles, de sorte que cette mesure semble être la meilleure mesure quantifiable pour caractériser les régimes d'incendie dans le but d'un cadre organisationnel. Les estimations des intervalles entre les incendies ont été fondées sur la chronologie alluviale (Meyer et al., 1995 ; Bigio et al., 2010), les sédiments lacustres (Roering et Gerber, 2005 ; Turner et al., 2008 ; Vannière et al., 2008 ; Whitlock et al., 2008), la dendrochronologie (Veblen et al., 2000 ; Heyerdahl et Alvarado, 2003 ; Kitzberger et Veblen, 2003 ; Swetnam et Baisan, 2003 ; Veblen et al., 2003) ou les statistiques de fréquence et de superficie (Nakagoshi et al., 1987 [Japon] ; Archibald et al., 2005 [Afrique du Sud] ; Díaz-Delgado et al., 2004 [Espagne] ; Malamud et al., Français 2005 [États-Unis d'Amérique] ; Jiang et al., 2009 [Canada] ; Krawchuk et Moritz, 2009 [Chine] ; O'Donnell et al., 2011 [Australie] ; Berner et al., 2012 [Sibérie], Kharuk et al., 2012 [Russie] ; Sass et al., 2012a [Suisse] ; Tessler, 2012 [Israël]). Les intervalles d'incendie basés sur les statistiques fréquence-superficie sont ensuite donnés pour une taille ou une zone spécifiée de l'incendie de forêt, AF ≥ 0,01 km2 ou ≥ 10 km2 (Malamud et al., 2005 ; Jiang et al., 2009). Français Nous renvoyons le lecteur à plusieurs efforts récents visant à affiner le concept de régime des incendies et à développer des modèles pour comprendre les interactions incendie-climat et les effets socio-économiques (par exemple Whitlock et al., 2010b; Bowman et al., 2011; Murphy et al., 2011). Les intervalles entre les incendies sont affectés par la répartition de la population humaine et l'utilisation des terres (Veblen et al., 2000; Pausas et Fernández-Muñoz, 2011; Pezzatti et al., 2011) et les changements climatiques (Baker, 2003; Swetnam et Baisan, 2003; Roering et Gerber, 2005; Whitlock et al., 2010b; Pausas et Fernández-Muñoz, 2011), mais les intervalles de récurrence des incendies ne changeront probablement pas sensiblement au cours de la prochaine décennie, qui est la période prévue pour cette étude.

2.2. Régimes de précipitations

Les précipitations constituent un facteur important dans la réponse aux incendies de forêt. La quantification des régimes de précipitations semble plus facile que celle des régimes d'incendie en raison des nombreuses mesures disponibles (voir la section 3.2 pour des exemples), mais il est plus difficile de décider quelles mesures se rapportent le mieux aux réponses post-incendie. Français Elles comprennent des mesures d'intervalle qui quantifient les caractéristiques variant dans le temps (telles que la profondeur totale des précipitations, l'intensité, la durée et les intervalles de récurrence), des mesures de séquence qui caractérisent le séquençage temporel des précipitations (Germanoski et al., 2002 ; Dunkerley, 2011), des mesures spatiales (telles que l'étendue et le gradient d'intensité des précipitations), le type de précipitations (tempête convective, tempête cyclonique, grêle, neige et pluie sur neige), la similarité d'échelle (Menabde et al., 1997 ; Harris et al., 1998) et les propriétés spatio-temporelles (Eagleson et Shack, 1966 ; Venugopal et al., 1999 ; Bernardara et al., 2003).

Français L'analyse profondeur-durée-fréquence caractérise les régimes de précipitations comme la profondeur probable qui s'accumulerait pendant les tempêtes de pluie d'une durée de m heures et d'une fréquence d'une fois tous les n ans (intervalle de récurrence, Hershfield, 1961 ; Miller et al., 1973 ; Pilgrim, 1987 ; Institution of Engineers, 1998 ; Brown et al., 2010 ; NOAA, 2012). En raison de la grande échelle spatiale, les prévisions de crues fluviales sont souvent basées sur des durées de précipitations de plusieurs heures (généralement 6 et 24 heures) et des intervalles de récurrence plus longs (10, 50 ou 100 ans) afin de caractériser les crues extrêmes moins fréquentes et rares, qui peuvent être plus dommageables et donc plus préoccupantes. Les inondations et les coulées de débris consécutives à un incendie de forêt peuvent être tout aussi dommageables, mais elles réagissent généralement à des précipitations de durée beaucoup plus courte (5, 15 ou 30 minutes) et plus fréquentes (intervalles de récurrence de 1, 2 ou 5 ans) en raison des changements dans les processus de pluie-ruissellement causés par les brûlages (Shakesby et Doerr, 2006 ; Moody et Martin, 2009b). Français De nombreux articles ont signalé que le débit de pointe et le flux de sédiments sont corrélés aux intensités maximales de précipitations d'une durée de 30 minutes ou moins (Moody et Martin, 2001a; Kunze et Stednick, 2006; Mayor et al., 2007; Spigel et Robichaud, 2007; Cannon et al., 2008; Moody et al., 2008a; Robichaud et al., 2008a; Cannon et al., 2010; Dunkerley, 2010; Cannon et al., 2011; Kean et al., 2011; Moody, 2012; Robichaud et al., 2013a,b), et que les tempêtes de pluie à faible intervalle de récurrence peuvent produire des inondations qui sont normalement associées à un intervalle de récurrence élevé.

Machine Translated by Google

Ces intervalles de faible récurrence peuvent être aussi courts que 2 ans (Moody et Martin, 2001a ; Conedera et al., 2003 ; Reneau et Kuyumjian, 2004 ; Kunze et Stednick, 2006). Bien que les analyses basées sur des précipitations d'une durée d'une heure soient courantes, celles portant sur des durées inférieures à une heure ne le sont pas ; cependant, des relations entre des durées plus longues et plus courtes ont été développées (Hershfield, 1961 ; Miller et al., 1973). Ainsi, nous suggérons que l'intensité des précipitations sur 2 ans et 30 minutes soit utilisée comme mesure quantifiable pour caractériser les régimes pluviométriques associés aux réponses post-incendie.

2.3. Régime hydro-géomorphique

Le régime hydrogéomorphique peut être quantifié par des paramètres tels que la pente topographique, les propriétés hydrauliques du sol, l'érodabilité du sol et des sédiments et l'apport de sédiments. La pente représente essentiellement la force de gravité qui détermine les réponses hydrologiques (infiltration et écoulement de surface) et sédimentologiques (détachement, transport et dépôt). La pente fait ici référence à une facette topographique (Daly et al., 1994), qui a approximativement la même orientation ou le même aspect, plutôt qu'à une mesure ponctuelle. La pente seule ne suffit pas à caractériser complètement le régime dans la mesure où la composante érosion dépend principalement de l'érodabilité du sol (Elliot et al., 1989 ; Flanagan et Nearing, 1995 ; Foster et al., 1995 ; Moody et al., 2005 ; Mataix-Solera et al., 2011) et deuxièmement du volume de sédiments stockés ou de l'apport de sédiments. Nous sommes d'accord avec Bryan (2000, p. 408) selon lequel « l'érodabilité du sol n'est pas une propriété unique et simplement identifiée », mais nous pensons que le facteur d'érodibilité du sol (facteur K) utilisé par l'équation universelle révisée de perte de sol (RUSLE) est une bonne première approximation pour un cadre organisationnel (Renard et al., 1997). Français Les valeurs du facteur K [L−3 T3] sont disponibles pour de nombreuses régions du monde (Foster et al., 1981 ; van Rompaey et al., 2003 ; ASRIS, 2012), ou peuvent être prédites à l'aide du nomogramme d'érodibilité du sol conventionnel (Wischmeier et al., 1971 ; Wischmeier et Smith, 1978), ou encore, des valeurs spécifiques au site peuvent être calculées en fonction des propriétés physiques et chimiques du sol (Lu et al., 2001 ; Vaezi et al., 2011). La pente est facilement calculée pour les modèles numériques d'élévation, mais l'échelle horizontale appropriée doit être sélectionnée pour représenter le processus. Ces deux variables peuvent être combinées en une seule en considérant la forme habituelle de l'équation de détachement du sol (Foster et al., 1977, 1995 ; Moody et al., 2005), D = kx, qui suppose que la quantité de sol érodé par unité de surface, D, est proportionnelle à une force motrice, l'énergie de la pluie ou l'eau courante, x (comme l'intensité de la pluie, la contrainte de cisaillement aux limites ou la puissance du courant) où la constante de proportionnalité k est une forme de l'érodabilité. La contrainte de cisaillement et la puissance du courant contiennent la pente, S, de sorte qu'une mesure hydrogéomorphique possible est le produit du facteur K d'érodabilité du sol et de la pente ou KS [L−3 T3].

2.4. Domaines d'intervention après un incendie de forêt

Les domaines de réponse post-incendie peuvent être quantifiés par l'intervalle de récurrence de l'incendie, l'intensité des précipitations sur 2 ans et 30 minutes et le produit érodibilité-pente. Les trois paramètres proposés ici ont un précédent dans la mesure où ils sont similaires à ceux utilisés par Swanson (1981, p. 411) « pour classer les écosystèmes en fonction du potentiel d'impact du feu sur les processus géomorphiques… » et pour définir un indice d'impact des incendies basé sur les principes physiques du transport des sédiments (Moody et Martin, 2004). Par exemple, dans le sud de la Californie, la réponse post-incendie prend souvent la forme d'inondations chargées de sédiments et de coulées de débris (Cannon et al., 2008, 2011 ; Kean et al., 2011 ; Schmidt et al., 2011 ; Robichaud et al., 2013b) et les réponses limitées aux sédiments sont rares. Ce domaine présente un climat de type méditerranéen, une faible altitude (maximum, 400 m) et une végétation de chaparral adaptée au feu avec des intervalles de feu inférieurs à 10 ans (Keeley et al., 2008). Le régime des précipitations comprend généralement des tempêtes frontales hivernales de longue durée avec quelques cellules encastrées de précipitations de forte intensité (régime pluviométrique Pacifique-Moyen ; intensité médiane sur 2 ans, 30 minutes de 30 mm h−1 : Moody et Martin, 2009a) et le régime hydrogéomorphique est tectonique actif avec des chaînes de montagnes abruptes et accidentées avec des pentes médianes de 0,56 (Moody et Martin, 2009a), ce qui entraîne une abondance de matériaux érodables (érodibilité médiane de 0,034 t-ha−1 /MJ ha−1 mm h−1) et une valeur médiane de KS de 0,019 t-ha−1 /MJ ha−1 mm h−1 En revanche, les écosystèmes montagnards souvent dominés par le . En conpin tordu (Pinus contorta ; altitude 2500–2700 m ; Weber, 1976) dans l'ouest intermontagneux des États-Unis ont connu des incendies de forêt peu fréquents (l'intervalle entre les incendies est de 300 à 600 ans ; Romme et Knight, 1981 ; Westerling et al., 2011) tandis que dans les écosystèmes dominés par le pin ponderosa (Pinus ponderosa ; altitude Français Les régions situées entre 1 800 et 2 500 m (Weber, 1976) ont connu des incendies de forêt plus fréquents (l'intervalle entre les incendies est de 15 à 40 ans ; Veblen et al., 2000). La majeure partie du ruissellement et de l'érosion dans les deux écosystèmes est une réponse à des tempêtes convectives de forte intensité pendant la saison estivale (l'intensité médiane sur 2 ans et 30 minutes est de 23 mm h−1 pour l'incendie de Yellowstone de 1988 dans l'écosystème montagnard et de 33 mm h−1 pour l'écosystème des contreforts le long de la chaîne frontalière du Colorado ; Hershfield, 1961 ; Moody et Martin, 2009a ; Moody, 2012). Français Dans les zones volcaniques brûlées par l'incendie de Yellowstone de 1988, les pentes médianes sont de 0,40, l'érodabilité de 0,016 t-ha−1 /MJ ha−1 mm h−1 et le KS de 0,0064 t-ha−1 /MJ ha−1 mm h−1 (Moody et Martin, 2009a). Dans le noyau granitique des montagnes Front-range du Colorado, les pentes médianes des multiples zones brûlées sont de 0,31, l'érodibilité médiane du sol est de , 0,014 t-ha−1 /MJ ha−1 mm h−1 et le KS est de 0,0043 t-ha−1 / MJ ha−1 mm h−1 (Moody et Martin, 2009a). Ces domaines post-incendies de forêt sont moins érodables que les domaines du sud de la Californie. Les estimations de ces mesures quantifiables peuvent être représentées graphiquement pour identifier les domaines présentant des caractéristiques de régime similaires (Fig. 1) et des cartes montrant la variabilité spatiale des trois régimes pour différentes zones sujettes aux incendies de forêt dans le monde seraient précieuses comme aides organisationnelles supplémentaires.

Toute réponse spécifique après un incendie de forêt est composée de quatre processus majeurs : les précipitations, l'infiltration, le ruissellement, l'érosion et le transport des sols et des sédiments. Ces processus sont liés par des états (humidité du sol et rugosité de la surface) et par des mécanismes de rétroaction. Par exemple, l'albédo de la surface terrestre change après un incendie de forêt (Wendt et al., 2007 ; Tryhorn et al., 2008 ; Montes-Helu et al., 2009 ; Beck et al., 2011).
Français Cela peut affecter le processus de précipitation et les précipitations modifient l'humidité du sol, ce qui à son tour affecte les processus de ruissellement (Chen et al., 2001 ; Tryhorn et al., 2008). La priorisation des questions de recherche dans cette revue a été évaluée en fonction du nombre de processus majeurs qui dépendent de la résolution d'une question de recherche. Les questions qui impliquent des mécanismes de rétroaction (par exemple, les sections 3.3, 3.4 et 6.1) augmentent leur priorité. Chaque processus est discuté dans une section distincte de cette revue et peut être lu quasi indépendamment. La section 3 traite des précipitations, la section 4 couvre l'infiltration et les propriétés du sol, la section 5 se concentre sur le ruissellement et la section 6 traite des processus d'érosion et de transport des sols et des sédiments. La résolution future des questions prioritaires dans chaque section devrait fournir des relations physiques quantitatives spécifiques pour la modification future ou le développement de modèles basés sur la physique des réponses au ruissellement et à l'érosion après un feu de forêt.

3. Précipitations : problématiques de recherche liées à la variabilité temporelle et spatiale des précipitations à méso-échelle

3.1. Contexte

Les précipitations constituent une variable essentielle pour les autres processus post-incendie (infiltration, ruissellement, érosion et transport des sols et des sédiments), qui ont tous leurs propres échelles spatiales et temporelles spécifiques. Une question prioritaire est de déterminer la paramétrisation la plus appropriée à utiliser pour quantifier les précipitations variables spatialement et temporellement en tant que variable pour les autres processus. Ces échelles spatiales et temporelles peuvent être interdépendantes car elles sont liées dynamiquement (Ormsbee, 1989 ; Foufoula-Georgiou et Krajewski, 1995 ; Venugopal et al., 1999 ; Bernardara et al., 2003), ce qui peut simplifier la quantification et la réduction d'échelle des champs de précipitations combinés spatio-temporels à la méso-échelle (1–104 km2). Contraintes sur la prédiction de la méso-échelle

Machine Translated by Google

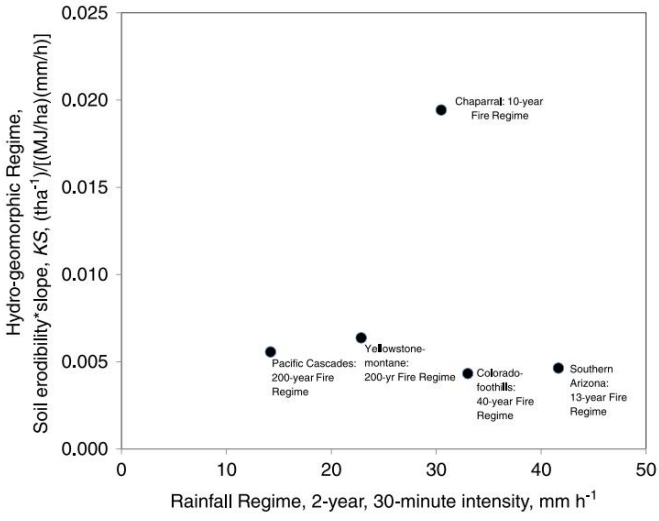

Fig. 1. Exemple de graphique bidimensionnel montrant les domaines de réponse sélectionnés après un incendie de forêt. Ce cadre organisationnel identifie les grandes similitudes de régime, qui peuvent ensuite être examinées plus en détail pour expliquer les différences de réponse. Voir le texte pour plus de détails sur les sites de Chaparral, Yellowstone-montane et Colorado-foothill. L'intervalle d'incendie pour les Pacific Cascades est tiré de Swanson (1981) ; pour Chaparral de Keeley et al. (2008) ; pour Yellowstone-montane de Westerling et al. (2011), pour Colorado-foothills de Veblen et al. (2000) ; et pour le sud de l'Arizona de Swetnam et al. (1992). Les paramètres du régime des précipitations et du régime hydrogéomorphique sont tirés du tableau 2 publié par Moody et Martin (2009a) (le facteur K du tableau 2 doit être multiplié par 0,040142 pour être converti en (t-ha−1)/(MJ ha−1 mm h−1).

La distribution des précipitations (définie comme une échelle suffisamment petite pour ne pas être affectée par la force de Coriolis de la Terre) a limité le succès de la prévision du ruissellement et de l'érosion après un incendie de forêt. Cependant, l'échelle de mesure (c'est-à-dire l'échelle de points pour les pluviomètres et l'échelle de surface pour les radars) peut être différente de celle des paramètres « effectifs » nécessaires aux modèles (Beven, 1996). Les modèles hydrologiques pour les prévisions de précipitations et de ruissellement sont à grande échelle (10 000 à 100 000 km2 ; Finnerty et al., 1997 ; Leavesley et Hay, 1998 ; Smith et al., 1999 ; Yates et al., 2000) et sont souvent basés sur des précipitations moyennes sur une période de 1 à 6 heures, ce qui masque toute variabilité à méso-échelle intégrée dans les systèmes météorologiques régionaux. Français C'est cette variabilité à méso-échelle qui est toutefois à l'origine des réponses rapides en milieu urbain (Cowpertwait et al., 2004) et après un incendie de forêt (Moody et Martin, 2001a ; Etheredge et al., 2004 ; Cannon et al., 2008 ; Kean et al., 2011) à l'échelle des pentes et des petits bassins (1 à 10 km2). La variabilité à méso-échelle peut changer de façon saisonnière au sein d'un régime de précipitations spécifique, mais peut également varier entre les régimes de précipitations, allant de précipitations de faible intensité et de longue durée spatialement homogènes à des précipitations de forte intensité et de courte durée spatialement hétérogènes. Des recherches météorologiques récentes (Chen et al., 2001 ; Vivoni et al., 2009 ; Moreno et al., 2012) se sont concentrées sur des modèles de précipitations à méso-échelle basés sur la physique (Grell et al., 1994 ; Skamarock, 2004), qui tentent d'intégrer les processus météorologiques à l'échelle des pentes de collines ou des petits bassins. La collaboration entre les chercheurs post-incendies de forêt et les météorologues à méso-échelle sera nécessaire pour faire progresser la mesure, la compréhension et la prévision des variations temporelles et spatiales des précipitations sur les zones brûlées. Bien que les variations temporelles et spatiales des précipitations puissent être liées à la méso-échelle, nous les explorons séparément dans les sections suivantes.

3.2. Variations temporelles des précipitations

L'accumulation des précipitations au cours d'un orage est une fonction discontinue du temps, ponctuée d'interludes intermittents de courte durée, sans pluie, suivis d'une accumulation rapide associée à des cellules de pluie intégrées dans un orage. Compte tenu de ce schéma, nous considérons ici deux propriétés :

premièrement, les totaux de précipitations pour une période donnée (paramètres d'intervalle), et deuxièmement, la nature des précipitations au sein d'une tempête et pendant une séquence de tempêtes (paramètres de séquence).

Différentes paramétrisations de l'intensité des précipitations et de leurs seuils ont été utilisées comme variables de base pour prédire l'infiltration, le ruissellement et les inondations subséquentes (Reaney et al., 2007). Par souci de simplicité, la plupart des prévisions d'infiltration après un incendie de forêt ont supposé des intensités de précipitations constantes (Robichaud, 2000 ; Woods et Balfour, 2008) pour modéliser l'infiltration dans la zone non saturée (Green et Ampt, 1911 ; Horton, 1939 ; Mein et Larson, 1973 ; Smith et Parlange, 1978 ; Kutílek, 1980 ; Smith et al., 2002). Quelques méthodes ne prédisent que le volume de ruissellement (courbe numérique, Mockus, 1972 ; Hawkins, 1973, 1993 ; Foltz et al., 2009) sans tenir compte de l'intensité des précipitations, mais la plupart des méthodes de prévision des taux de ruissellement (comme l'hydrogramme unitaire instantané, Sherman, 1932 ; ou la méthode de la courbe numérique, Soil Conservation Service, 1972) utilisent des intensités de précipitations constantes compatibles avec l'utilisation de tempêtes de référence pour l'évaluation des risques d'inondation. Aujourd'hui, cependant, avec l'utilisation accrue de pluviomètres à haute résolution temporelle (permettant des mesures quasi continues) et de modèles numériques améliorés capables de gérer de longues séries chronologiques, la question la plus importante devient : « Quel est l'intervalle de moyenne temporelle approprié pour les précipitations à méso-échelle qui quantifie le mieux les propriétés des précipitations en tant que facteurs de réponse après un incendie de forêt » (Fig. 2) ? Français Par exemple, il a été constaté que les intensités de pluie sur 10 minutes correspondaient le mieux au taux d'érosion du sol (Spigel et Robichaud, 2007), que les intensités de pluie sur 15 minutes correspondaient le mieux au moment de la coulée de débris (Kean et al., 2011) et que les intensités de pluie sur 30 minutes correspondaient le mieux au débit de pointe des crues (Moody, 2012). Le calcul de la moyenne des données pose un problème : il peut entraîner la perte de détails importants sur les processus, tels que les temps de latence entre le pic de précipitations et le pic de ruissellement (Yu et al., 1997).

Les précipitations sont généralement exprimées comme une hauteur accumulée pendant un intervalle donné (par exemple 5 minutes, 1 heure ou 1 jour) ou comme le temps nécessaire pour accumuler une quantité constante (par exemple 1 mm ou 0,01 pouce). Les mesures de précipitations qui ont été utilisées comprennent :

(1) Total precipitation amount (Robichaud et al., 2006a, 2008a, 2008b; Cannon et al., 2010; Robichaud et al., 2013a, b);

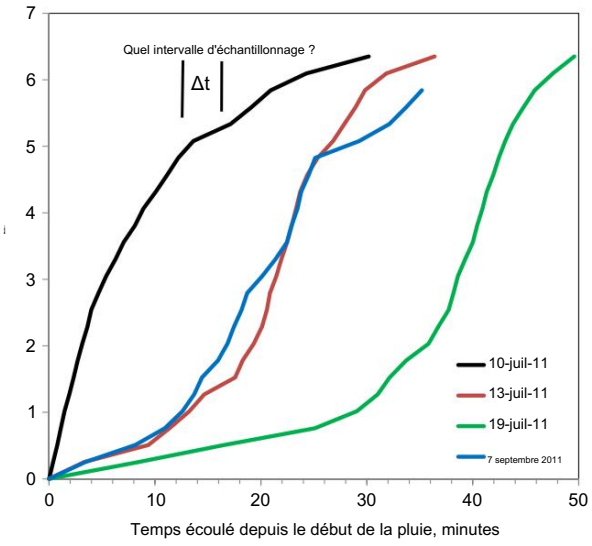

Fig. 2. Variabilité temporelle des précipitations à méso-échelle. Exemples de profils de précipitations cumulées recueillies dans une zone brûlée par l'incendie de Fourmile Canyon en 2010 dans le Colorado. Les données cumulatives sont des données de précipitations de base provenant d'un pluviomètre à augets basculants de 15 cm de diamètre, où chaque auget représente 0,254 mm de pluie et dont les intervalles de temps sont irrégulièrement espacés. Le temps écoulé pour le 7 septembre 2011 a été divisé par 10 afin de le montrer ici sur le même graphique avec les autres orages. Le problème est de savoir quel intervalle d'échantillonnage, Δt, est approprié à utiliser pour relier l'intensité des précipitations aux processus de ruissellement et d'érosion observés. Les profils de précipitations correspondants sont présentés dans la figure 3.

Machine Translated by Google

(2) Average storm intensity (Cannon et al., 2010); (3) Intra-
event rainfall intensities for varying duration (Moody and Martin, 2001a; Kunze and Stednick, 2006; Robichaud et al., 2006a; Mayor et al., 2007; Spigel and Robichaud, 2007; Cannon et al., 2008; Moody et al., 2008a; Robichaud et al., 2008a, b; Cannon et al., 2010; Dunkerley, 2010; Cannon et al., 2011; Kean et al., 2011; Robichaud et al., 2013a, b); (4) AI15 (amount of rainfall multiplied by the maximum 15-minute intensity; Mayor et al., 2007)

(5) Une intensité de pluie géomorphiquement efficace théorisée (Flanagan et Nearing, 1995) ;
(6) Érosivité des précipitations (Renschler et al., 1999; Kunze et Stednick, 2006; Pietraszek, 2006; Wagenbrenner et al., 2006; Spigel et Robichaud, 2007); et (7) Relations intensité-durée
temporellement continues (Cannon et al., 2008, 2011 ; Staley et al., 2012).

Bien que certaines de ces mesures d'intervalle semblent intuitivement logiques, seules quelques-unes ont été directement liées aux processus physiques dans les zones brûlées (Kean et al., 2011), et certaines ont été utilisées pour définir des seuils géomorphiques (Cannon et al., 2011). L'analyse statistique multivariée a été utilisée pour identifier les mesures de précipitations les plus significatives pour expliquer les coulées de débris après incendie et leurs volumes (Gartner et al., 2008 ; Cannon et al., 2010), mais la signification physique de ces mesures n'est pas claire, de sorte que les recherches futures devraient se concentrer sur l'établissement d'une base physique pour quantifier les précipitations à des échelles de temps déterminées par l'échelle spatiale d'intérêt, c'est-à-dire un point, une parcelle, une pente de colline ou un bassin.

La réponse temporelle du ruissellement d'un bassin aux précipitations est intrinsèquement liée aux échelles spatiales, déterminées par le processus d'infiltration, le réseau de drainage et les vitesses d'écoulement au sein de ce réseau. Plutôt que d'être une réponse directe aux précipitations, le ruissellement répond à l'intensité réelle des précipitations moins le taux d'infiltration et le stockage topographique (pluies efficaces). Cela produit une réponse non linéaire (Overton, 1970) souvent caractérisée par des seuils (Doehring, 1968 ; Inbar et al., 1998 ; Reneau et Kuyumjian, 2004 ; Kunze et Stednick, 2006 ; Kean et al., 2011 ; Moody, 2012) et d'autres facteurs qui doivent être pris en compte lors du choix d'une échelle appropriée pour quantifier les précipitations. Par exemple, le temps de concentration (Barfield et al., 1981 ; Dick et al., 1997) peut être une échelle de temps appropriée pour déterminer l'intervalle de temps moyen des précipitations, mais dans certains régimes de précipitations dans certains paysages arides et semi-arides (qui peuvent réagir de manière similaire aux zones nues et brûlées en termes de ruissellement et d'érosion), le temps de concentration pour un écoulement continu sur les pentes est souvent plus long que la durée de l'orage (Yair et Raz-Yassif, 2004). À mesure que l'on s'approche de l'échelle du bassin, la réponse du ruissellement aux fluctuations à haute fréquence (de courte durée) de l'intensité des précipitations est atténuée (Eagleson et Shack, 1966) par l'augmentation et la variabilité des temps (temps de concentration) nécessaires pour acheminer l'eau à travers les différentes parties du réseau de drainage (Milly et Wetherald, 2002 ; Wainwright et Parsons, 2002 ; Smith et al., 2004).

Français Ces effets de réseau sur la réponse du bassin ont été étudiés à l'aide de l'hydrogramme unitaire instantané géomorphique (Rodriguez-Iturbe et Valdes, 1979 ; Rinaldo et al., 1991), qui supposait initialement des précipitations efficaces et une vitesse de drainage constante, bien que cette dernière hypothèse ait été modifiée ultérieurement pour inclure des vitesses variables (Robinson et al., 1995 ; Saco et Kumar, 2002). De plus, à mesure que l'échelle spatiale augmente, l'intensité des précipitations seuil pour la génération de ruissellement dans les paysages semi-arides augmente d'environ 4 mm h−1 pour une zone de 10 m2 à 22,5 mm h−1 pour une zone de 106 m2 (Cammeraat, 2004). Ainsi, la mesure de l'intervalle de précipitations doit tenir compte des facteurs suivants : l'échelle spatiale, les caractéristiques géomorphiques des modèles de réseau de drainage, le processus d'infiltration, les effets de la distribution inégale restante de litière ou d'humus et la distribution des dépressions topographiques (voir la section 4).

Le paramétrage de l'intensité des précipitations en tant que précipitations totales sur un intervalle de temps donné ne donne aucune information sur la séquence temporelle des intensités des précipitations intra-orageuses. La séquence détaillée au sein d'une tempête peut être importante en termes de réponse du processus (Beven, 1996) et des méthodes de réduction d'échelle ou de désagrégation, en supposant que la distribution dans les intervalles plus courts est proportionnelle à celle dans les intervalles plus grands (Ormsbee, 1989). Les séquences temporelles peuvent avoir des modèles très différents mais les mêmes moyennes et intensités maximales. L'intensité peut augmenter rapidement, atteindre un pic et diminuer progressivement (Fig. 3A), ou elle peut augmenter progressivement vers le pic (Fig. 3C) ou il peut y avoir plusieurs pics avec des intervalles de durée variable (Fig. 3D). Les premiers efforts pour caractériser la variabilité temporelle des précipitations se sont concentrés sur la classification. Par exemple, en se basant sur le résultat selon lequel la majorité des pluies mesurées dans un réseau de 49 pluviomètres enregistreurs dans le centre-est de l'Illinois, aux États-Unis, tombaient dans une brève période du profil total des précipitations, un système de classification a été basé sur la division du profil des précipitations en quatre parties égales et sur la détermination du trimestre (1er, 2e, 3e ou 4e) où les pluies les plus fortes sont tombées (Huff, 1967). Français Cette variabilité temporelle des précipitations est souvent appelée « régime des précipitations » (Smith, 1972 ; Xue et Gavin, 2008) ou « profil d'événement » (Dunkerley, 2011). Elle peut affecter la réponse à l'infiltration (Winchell et al., 1998 ; Xue et Gavin, 2008), le temps de stagnation (Smith, 1972), la réponse au ruissellement (Reaney et al., 2007 ; Dunkerley, 2011) et la réponse à l'érosion (Lanini et al., 2009). Les différences dans la séquence des intensités des précipitations au sein d'une tempête de pluie peuvent expliquer pourquoi le même bassin peut réagir différemment à des tempêtes de pluie ayant des paramètres d'intervalle similaires (Dick et al., 1997 ; Reaney et al., 2007). Il a également été démontré que les paramètres de tempête tels que le coefficient de variation et le temps entre les impulsions de tempête affectent les coefficients de ruissellement et les distances d'écoulement du ruissellement (Reaney et al., 2007).

3.3. Variations spatiales des précipitations

Français Les feux de forêt sont fréquents dans les terrains montagneux à topographie complexe, et donc, les variations spatiales des précipitations sont liées à la topographie et aux variations des propriétés de surface du paysage. Les effets orographiques régionaux sur les précipitations associées aux tempêtes cycloniques sont connus depuis longtemps (Spreen, 1947 ; Burns, 1953 ; Linsley, 1958), et ces effets ont plus récemment été intégrés dans les modèles numériques (par exemple, les régressions précipitations-élévation sur un modèle de pente indépendant, PRISM ; Daly et al., 1994), mais on en sait moins sur les effets sur les tempêtes convectives de méso-échelle plus petites. Les analyses spatiales des données de précipitations convectives indiquent qu'il existe des « zones de genèse » ou « points chauds » avec des précipitations plus intenses que dans les zones environnantes (Henz, 1973 ; Banta et Schaaf, 1987 ; Williams et Moody, 2003 ; Hanshaw et al., 2008). Ils sont communs sur le terrain des montagnes Rocheuses du Colorado et existent probablement dans d'autres régimes de précipitations.
Bien que l'échelle de ces points chauds ait été identifiée pour certains régimes de précipitations, leur effet sur le ruissellement reste inconnu. Les recherches futures doivent d'abord les identifier et comprendre les processus physiques qui les créent. Une collaboration plus poussée avec les météorologues est nécessaire pour développer des méthodes de quantification des précipitations beaucoup plus détaillées que celles actuellement réalisées à l'aide de réseaux de pluviomètres et de radars météorologiques conventionnels. Certaines possibilités consistent à utiliser des radars portables à bande C (Jorgensen et al., 2011) et à bande X (Matrosov et al., 2013) qui peuvent recueillir des mesures à double polarisation de l'intensité des précipitations à des échelles appropriées nécessaires à la caractérisation des propriétés spatiales et temporelles des tempêtes à méso-échelle lorsqu'elles traversent un terrain brûlé.
Un exemple est le concept d'« empreinte » ou la taille de la tempête, qui peut dépendre de la topographie. L'analyse des radars Doppler historiques a montré que la taille de l'empreinte dépend de l'intensité des précipitations, qui diminue de manière exponentielle (Fig. 4) avec l'augmentation de la surface coïncidant avec l'intensité maximale sur 30 minutes (Williams et Moody, 2003). L'analyse des mesures de précipitations à double polarisation sur une topographie spécifique peut également être utilisée pour améliorer les méthodes de réduction d'échelle des précipitations (Ormsbee, 1989 ; Cowpertwait et al., 2004) pour estimer les caractéristiques temporelles et spatiales des précipitations à méso-échelle, et pour identifier et comprendre les trajectoires des tempêtes. La réponse du bassin après un incendie de forêt dépend de la direction du mouvement de la tempête par rapport au réseau de drainage dans les bassins non brûlés (Ogden et al., 1995) et brûlés. Les données pluviométriques à haute résolution de ces radars

Machine Translated by Google

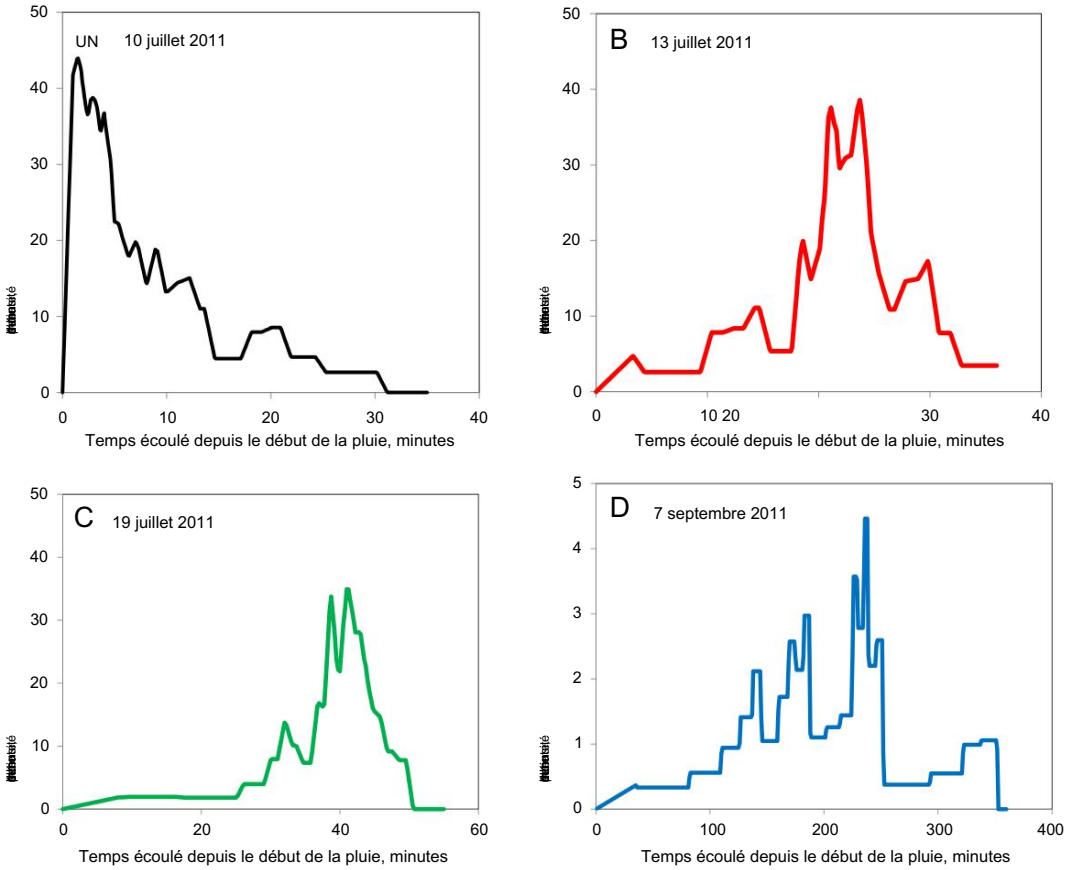

Fig. 3. Exemples de profils d'intensité des précipitations mesurés dans une zone brûlée par l'incendie de Fourmile Canyon en 2010 dans le Colorado. Ces profils d'intensité des précipitations correspondent aux profils cumulés de la Fig. 2. Les profils des 10, 13 et 19 juillet 2011 correspondent à des tempêtes convectives de courte durée et de forte intensité et l'intervalle d'échantillonnage interpolé était égal à 1 min. Le profil du 7 septembre 2011 correspond à une tempête frontale de longue durée et de faible intensité.

pourrait améliorer la saisie dans un générateur météorologique quotidien stochastique tel que CLIGEN (Nicks et al., 1995), qui est maintenant paramétré par le PRISM à l'échelle régionale (Daly et al., 1994) et les Rocheuses climate generator (Rock:Clime; Elliot et al., 1999; Robichaud et al., 2007b; Elliot et Hall, 2010) . Ces modèles sont utilisés dans Projet de prévision de l'érosion hydrique (WEPP ; Flanagan et Nearing, 1995) dans le cadre de l'outil de gestion des risques d'érosion (ERMiT; Robichaud et al., 2006b). Cependant, les modèles CLIGEN et Rock:Clime les modèles supposent désormais que les tempêtes ont une intensité fixe qui varie dans le temps spécifiques à chaque site, sont uniformément réparties sur l'étendue spatiale du modèle domaine et sont stationnaires, ce qui limite leurs performances.

Dans de nombreux bassins brûlés, la variabilité spatiale, ou la dispersion, des précipitations pendant une tempête peut être si grande que le concept d'intensité constante la tempête de conception n'est pas représentative des conditions réelles et donc a une utilisation limitée (Moody et Martin, 2001a) car les conditions préalables (par exemple la teneur en eau du sol et la rétention en surface) sont souvent négligé (Ormsbee, 1989).

Outre la topographie, la répartition spatiale du paysage les propriétés de surface peuvent influencer les précipitations à méso-échelle par rétroaction mécanismes. Généralement, ces propriétés comprennent les caractéristiques du sol et les effets microtopographiques sur la rétention des eaux de surface. Conceptuellement, l'hydrologie du sol agit comme un filtre passe-bas (Wu et al., 2002) de haute fréquence des précipitations. L'eau est stockée dans le sol et libérée lentement dans l'atmosphère. Cela fournit un mécanisme de rétroaction, par lequel Les précipitations d'une tempête précédente peuvent affecter directement les précipitations d'une tempête ultérieure. Ainsi, la séquence des tempêtes de pluie est liée aux conditions d'humidité du sol peut affecter la réponse post-incendie (Chen et al., 2001; Germanoski et al., 2002). Étant donné que les zones brûlées ont un albédo plus faible (Chen et al., 2001 ; Randerson et coll., 2006 ; Tryhorn et coll., 2008 ; Tsuyuzaki et coll., 2009) et ont tendance à sécher plus rapidement que les zones végétalisées (Moody et al., 2007), la température de surface peut également être plus élevée que sur la zones environnantes non brûlées. Une telle anomalie de température de surface chaude a été créée par une zone brûlée par l'incendie de Buffalo Creek en 1996 Les montagnes du Front Range du Colorado et les anomalies de surface froides ont été créées par des averses de pluie précédentes à proximité de la zone brûlée (Chen et al., 2001). Cette distribution de température a eu un effet suffisamment important pour provoquer une la tempête convective sera confinée aux régions plus chaudes (~6 °C plus élevées) surface, entraînant une tempête de pluie centennale sur la zone brûlée (Chen et al., 2001). La taille de la zone brûlée (4 700 ha) ne peut pas à elle seule ont été suffisantes pour créer la circulation convective locale, mais au lieu de cela, cela aurait pu déclencher des précipitations convectives, qui étaient proches un seuil. Ainsi, les distributions spatiales des propriétés du sol fournissent une lien probablement important entre le régime des précipitations et les brûlures paysages.

3.4. Priorités de recherche futures

Il est reconnu que les précipitations à méso-échelle sont le principal facteur de risque après un incendie de forêt. réponse au ruissellement et à l'érosion, et se caractérise par une courte durée et une forte La variabilité temporelle et spatiale des fréquences, qui est influencée par la topographie complexe et les propriétés de la surface du sol. Comment quantifier ses effets nécessitera des recherches collaboratives avec les météorologues, ce qui a tellement ont jusqu'à présent été largement absentes. Les quatre priorités de recherche ci-dessous sont liées aux effets de la variabilité temporelle et spatiale des précipitations à méso-échelle sur ruissellement et infiltration après un incendie de forêt. Les deux premiers sont vastes et concernent le rôle des propriétés du sol dans la liaison des précipitations à l'infiltration et au ruissellement. La troisième priorité concerne un éventuel mécanisme de rétroaction entre le sol

Machine Translated by Google

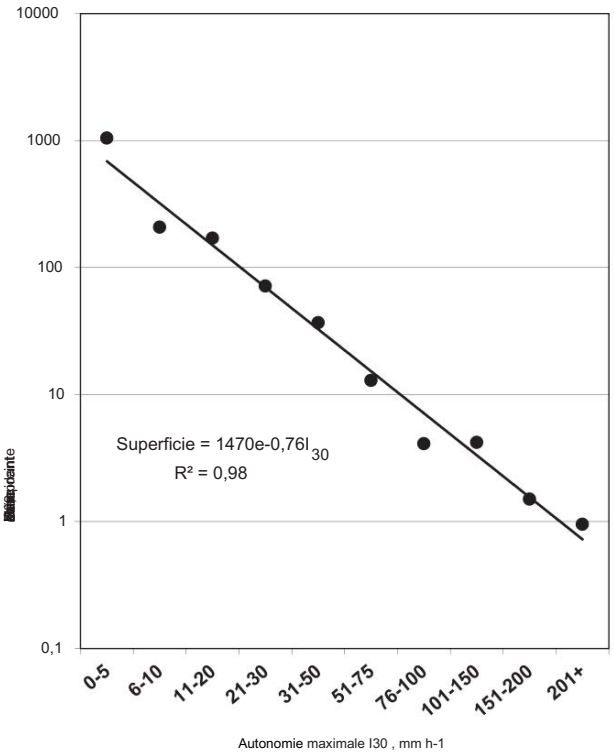

Fig. 4. Empreinte aréolaire des précipitations en fonction de leur intensité. Relation entre une variable pluviométrique possible, l'intensité maximale des précipitations sur 30 minutes (I30), et la zone de précipitations coïncidente ou « empreinte » sur le sol. Les données proviennent de l'analyse des données radar Doppler historiques de 20 tempêtes (1995-2001) au-dessus d'une zone brûlée par l'incendie Hayman de 2002 dans le Colorado (Williams et Moody, 2003).

propriétés, et le quatrième considère les effets topographiques sur les précipitations à méso-échelle.

(1) Quelles mesures d'intervalle de temps expliquent le mieux les réponses d'infiltration et de ruissellement après un incendie de forêt à une échelle spatiale donnée, et comment ces mesures évoluent-elles avec les échelles spatiales ou le domaine après un incendie de forêt ? Cela nécessitera une meilleure résolution temporelle des précipitations et une meilleure compréhension de la variation spatiale des taux d'infiltration après un incendie de forêt.

(2) Quelles mesures de séquence représentent le mieux le changement de temps au sein d'une tempête (profil des précipitations), la configuration de plusieurs tempêtes et les intervalles secs, et comment influencent-elles la réponse à l'infiltration et au ruissellement après un incendie de forêt ? Quels facteurs contrôlent les mesures clés de la séquence des précipitations, et existe-t-il des similitudes entre les domaines post-incendie de forêt ?

(3) Quelle est l'ampleur des mécanismes de rétroaction possibles dans une zone brûlée entre la distribution spatiale des propriétés du sol et celle des précipitations à méso-échelle ? Quel est le contrôle dominant de ce mécanisme de rétroaction (humidité du sol, gravité du brûlage ou végétation) et comment la rétroaction évolue-t-elle au fil du temps avec la récupération après un incendie de forêt ?

(4) Comment la topographie affecte-t-elle la distribution spatiale des précipitations à méso-échelle, et quelle est son importance dans le contrôle de l'emplacement des zones de genèse ou des points chauds des précipitations persistantes de forte intensité et de « l'empreinte » des tempêtes de pluie ?

4. Infiltration : quantification des propriétés du sol et des effets hydrauliques

4.1. Contexte

Les incendies de forêt provoquent plusieurs changements géomorphologiques importants dans les propriétés du sol, notamment la modification du profil du sol avant l'incendie et le développement d'une variation spatiale des propriétés du sol.

Français Une partie ou la totalité des couches de litière et d'humus (Robichaud et Miller, 1999), modifie la couche de sol minéral à différentes profondeurs selon le régime d'incendie (Doerr et al., 2009), peut induire ou renforcer une couche hydrofuge (Krammes et Osborn, 1969; DeBano, 2000; Doerr et al., 2000; Coelho et al., 2004; Woods et al., 2007; Finley et Glenn, 2010), et dépose une couche superficielle de cendres (Fig. 5) contenant des quantités variables de sol minéral et de substances organiques en raison de l'augmentation du transport par le vent pendant l'incendie (Byram et Martin, 1970). Cette couche de cendres est généralement hydrophile (Kinner et Moody, 2010; Woods et Balfour, 2010), bien que des cendres hydrophobes aient été signalées (Bodi et al., 2011). Français L'augmentation du ruissellement provenant des zones brûlées peut être causée soit par un écoulement de surface par infiltration ou par saturation, soit par une combinaison des deux (Sheridan et al., 2007 ; Onda et al., 2008 ; Ebel et al., 2012). L'augmentation du ruissellement est souvent attribuée à la répulsion de l'eau du sol (SWR), à l'augmentation de la quantité de sol nu (Benavides-Solario et MacDonald, 2005 ; Larsen et al., 2009), à la diminution de l'interception par la canopée (Stoof et al., 2012) et à l'absence de stockage d'eau de surface. Toute « couche » d'humus non brûlé restante (litière partiellement décomposée avec humus, Robichaud et Miller, 1999) sous la couche de cendre peut également créer des zones hydrofuges lorsqu'elles sont sèches, mais des zones absorbantes d'eau lorsqu'elles sont humides. Cette répartition inégale accroît la variabilité spatiale des propriétés du sol (Moody et al., 2007) et complique la compréhension des réactions d'érosion et de ruissellement après un feu de forêt. Même lorsque le ruissellement est extrême, des précipitations prolongées peuvent transformer le sol en un état mouillable « normal » (Doerr et al., 2000 ; Stoof et al., 2011a), mais le sol peut retrouver son état répulsif une fois que les conditions sèches reviennent (Shakesby et al., 2000).

De plus, l'effet de la répulsion de l'eau diminue avec l'augmentation de l'échelle spatiale (Larsen et al., 2009). Un faible ruissellement a été observé dans les zones où le SWR est élevé (Stoof, C., Cornell University, per. commun. 2013), et un ruissellement élevé après un incendie de forêt a également été observé là où le SWR est absent, ce qui indique que la présence de SWR n'est pas toujours nécessaire pour produire des inondations extrêmes (Meyer et Wells, 1997 ; Cannon et al., 2010).

Les propriétés et la distribution spatiale des cendres (Goforth et al., 2005; Kinner et Moody, 2008; Pereira et al., sous presse), de l'humus (Robichaud et Miller, 1999) et des couches minérales affectées par le feu (Ulery et al., 1996; Woods et al., 2007) ne sont pas bien connues et les recherches se sont concentrées sur l'échelle de la parcelle, parfois sur celle de la pente (Robichaud et Miller, 1999), mais pas sur celle du bassin. Cependant, les résultats limités obtenus indiquent une variabilité spatiale suffisante pour suggérer que le concept de « couche » de cendres ou de SWR est peut-être trompeur et devrait être remplacé par celui de « parcelles » ou plus précisément d'une « mosaïque de parcelles d'épaisseur variable » (Woods et al., 2007; Kinner et Moody, 2010; Pereira et al., sous presse). Ce concept de parcelles est appuyé.

Fig. 5. Couche de cendre noire d'environ 1 cm d'épaisseur et couche de sol minéral sous-jacente dans une zone brûlée au Colorado.

Machine Translated by Google

par DeBano et al. (1998) qui ont déclaré que « la répulsion de l'eau produite par le feu est généralement limitée aux zones situées sous la canopée des plantes » (Fig. 6). Ainsi, le ruissellement généré sur ces zones hydrofuges peut s'infiltrent via les cendres mouillables et les parcelles de sol (Shakesby et al., 2000 ; Doerr et al., 2009 ; Jackson et Roering, 2009). Le réchauffement du sol sous ces parcelles peut modifier l'érodabilité du sol en détruisant la matière organique

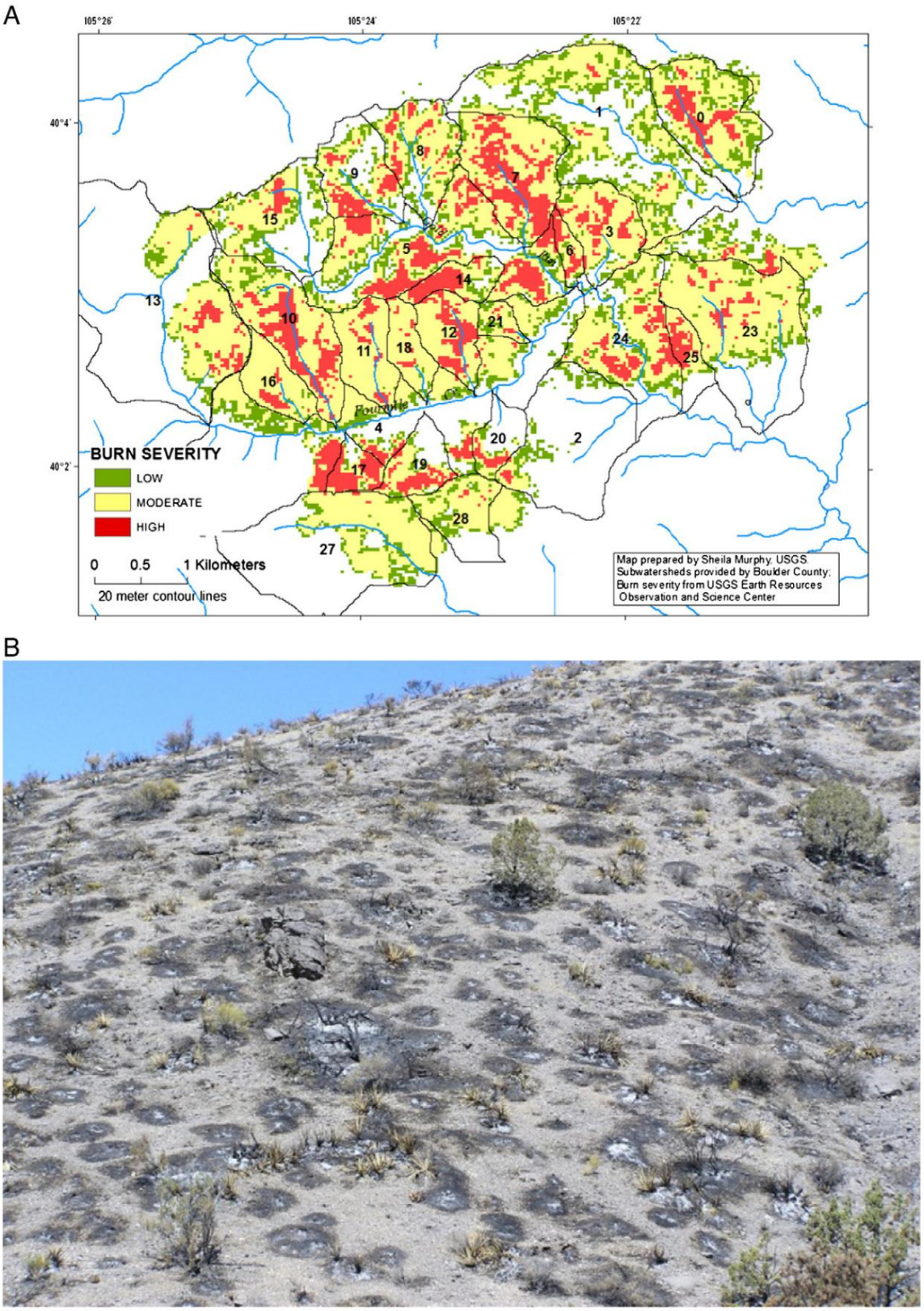

Fig. 6. (A) Carte de la gravité des incendies de 2010 à Fourmile Canyon, à l'ouest de Boulder, Colorado, États-Unis. Cette carte de classification de la réflectance des zones brûlées (carte BARC) est basée sur des valeurs de regroupement de ΔNBR. La variabilité spatiale à grande échelle de la gravité est évidente. (B) Variabilité spatiale à petite échelle de la gravité des incendies associée à la distribution spatiale de la végétation sur une pente de colline brûlée par un feu de forêt dans le désert de Mojave, Californie, États-Unis. Les zones de cendre blanche indiquent une combustion plus complète et donc une plus grande gravité des incendies (causée par des températures plus élevées et/ou une durée plus longue) que les zones de cendre gris foncé. Les zones de couleur gris-brun clair correspondent à du sol nu.

Machine Translated by Google

et des liaisons chimiques (Giovannini et Lucchesi, 1983 ; Giovannini et al., 1988) dans le sol pour réduire la contrainte de cisaillement critique nécessaire pour initier l'érosion (Moody et al., 2005). Enfin, les feux de forêt graves peuvent produire de nombreux trous de souches et de racines brûlées (Fig. 7), qui augmentent le stockage de dépression pré-incendie existant à la surface du sol et peuvent provoquer une augmentation du débit dans les tuyaux. L'ampleur et l'étendue spatiale de ces zones affectées par le feu sont des indicateurs de la gravité de la brûlure.

4.2. Gravité des brûlures et propriétés hydrauliques du sol

Français L'infiltration post-incendie dans la zone non saturée est contrôlée par les changements induits par le feu dans l'interception des précipitations, le stockage de l'eau dans le sol et les propriétés hydrauliques du sol. Les effets du feu sont souvent décrits par des indices qualitatifs tels que la gravité du feu, la gravité des brûlures (Keeley et al., 2008 ; Keeley, 2009) ou la gravité des brûlures du sol (Parsons et al., 2010), qui décrivent la consommation de matière organique aérienne en termes qualitatifs (tels que élevée, modérée et faible ; Keeley et al., 2008), mais ne sont pas directement liés aux changements des propriétés hydrauliques du sol. Ce n'est que récemment que les effets du feu ont été liés à des paramètres quantifiables (sol nu exposé, dommages aux racines fines, hydrophobie, changement de couleur et structure du sol, Parsons et al., 2010). La consommation de matière organique est spatialement variable et reflète souvent la distribution spatiale de la végétation avant le feu (DeBano et al., 1998) en plus du comportement du feu (Fig. 6).

Français Les effets du feu sur les propriétés du sol ont été caractérisés indirectement par deux mesures de la gravité des brûlures associées à deux échelles spatiales différentes. La mesure SWR (King, 1981 ; Letey et al., 2000) est mesurée au sol à l'échelle d'un point à une parcelle (1 cm2 –100 m2) et est intéressante en raison de sa simplicité. Trois mesures SWR sont fréquemment utilisées pour évaluer la gravité des brûlures : (1) le test du temps de pénétration des gouttes d'eau (WDPT, DeBano, 1981 ; Letey et al., 2000 ; Huffman et al., 2001), qui représente la persistance (Karunarathna et al., 2010) ou le temps nécessaire pour que l'angle de contact change pour permettre l'infiltration (Regalado et Ritter, 2009) ; (2) le test de molarité des gouttelettes d'éthanol (MED, Letey et al., 2000 ; Woods et al., 2007), qui mesure la tension superficielle critique ; et (3) le volume d'eau qui s'infiltre en 1 min (1VOL) à partir d'un infiltromètre à tension (Robichaud et al., 2008c). L'autre mesure (changement du taux de combustion normalisé, ΔNBR, Key et Benson, 2004 ; van Wagtendonk et al., 2004) est mesurée à distance à partir d'images satellites à l'échelle de la pente de la colline et du bassin (102 –106 m2), et est intéressante en raison de sa large couverture spatiale. Le changement du taux de combustion normalisé, ΔNBR, représente la différence entre les images post-incendie et pré-incendie de la réflectance de la surface terrestre pour deux bandes mesurées par le satellite Landsat. Une bande est sensible à la végétation verte (proche infrarouge) et l'autre au sol nu (infrarouge à ondes courtes). Français Le rapport varie d'environ −100 (non brûlé) à 1 000 (gravement brûlé), et ils sont vérifiés sur le terrain en utilisant des méthodes normalisées, mais subjectives, pour évaluer la gravité des brûlures du sol (Parsons et al., 2010). Les valeurs de ΔNBR sont ensuite regroupées en valeurs qualitatives de classes de gravité des brûlures du sol élevées, modérées et faibles, qui sont présentées sur des cartes de gravité des brûlures (par exemple, Chafer, 2008). Aucune de ces mesures ne donne une mesure directe des propriétés hydrauliques du sol affectées par le feu, telles que la conductivité hydraulique ou la sorptivité (Smith et al., 2002), mais elles fournissent des évaluations indépendantes des effets du feu. D'autres mesures qui pourraient être prometteuses incluent les mesures de télédétection hyperspectrale et multispectrale (Kokaly et al., 2007 ; Robichaud et al., 2007c ; Lewis et al., 2008).

Malheureusement, ces mesures de gravité des brûlures ne quantifient pas les fonctions hydrauliques du sol importantes nécessaires à l'étude de l'infiltration. Les théories traditionnelles de l'infiltration nécessitent deux fonctions hydrauliques du sol (la courbe de rétention d'eau du sol et la fonction de conductivité hydraulique) pour décrire l'infiltration dans la zone non saturée (Smith et al., 2002). La courbe de rétention d'eau du sol est une relation entre le potentiel matriciel, ψ [L], et la teneur en eau du sol, θ [L3 L−3], et la fonction de conductivité hydraulique est la relation entre θ et la conductivité hydraulique, K [L T−1], (Smith et al., 2002). Certains travaux ont été réalisés pour

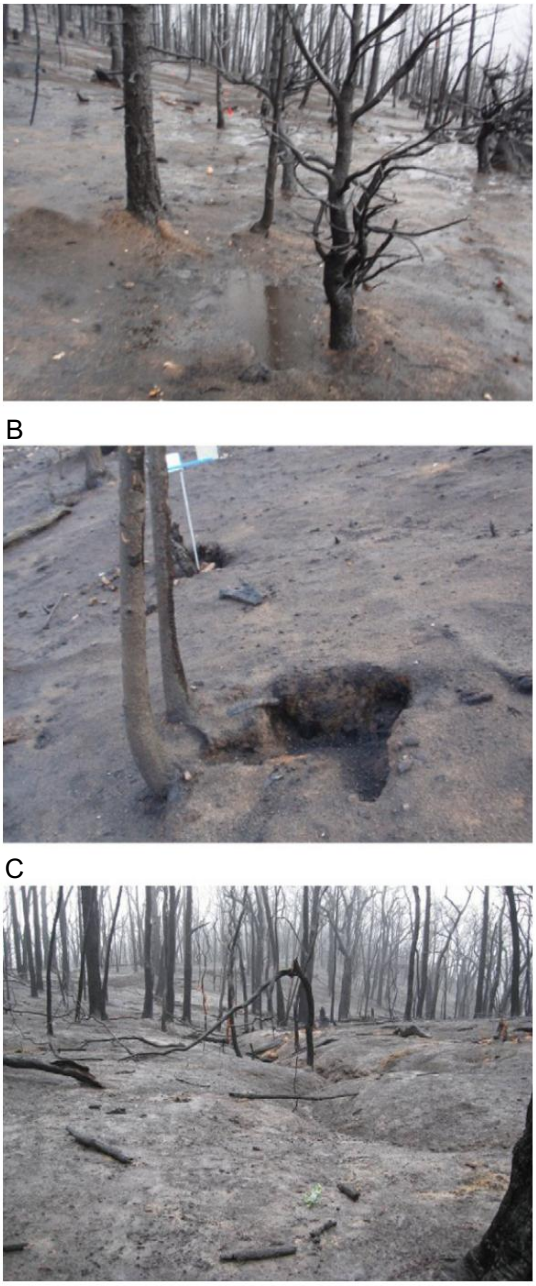

Fig. 7. (A) Connectivité des écoulements de surface sur une pente brûlée par l'incendie de Fourmile Canyon de 2010 à l'ouest de Boulder, Colorado, États-Unis. (B) Stockage dans les dépressions et trous de racines (représentés par des ovales hachurés sur la Fig. 10) également dans la zone brûlée par l'incendie de Fourmile Canyon de 2010 à l'ouest de Boulder, Colorado, États-Unis. (C) Rugosité de surface, stockage dans les dépressions et drainages brûlés par les feux de forêt du samedi noir de 2009 dans la région de Kinglake à Victoria, en Australie.

Français commencer à quantifier les effets du SWR (Ebel et Moody, 2012) et du ΔNBR sur les fonctions hydrauliques du sol (Lewis et al., 2008) pour les sols affectés par le feu. Des travaux récents (Bachmann et al., 2007 ; Karunarathna et al., 2010) pour les sols non affectés par le feu ont généré des modèles empiriques pour les courbes caractéristiques de répulsion sol-eau (c'est-à-dire les mesures SWR par rapport à θ et les mesures SWR par rapport à ψ). Ainsi, une priorité de recherche est de comprendre comment le SWR et le ΔNBR sont liés aux propriétés hydrauliques du sol des sols affectés par le feu. Pour y parvenir, il faudra davantage de mesures sur le terrain et en laboratoire des mesures de la gravité des brûlures du sol ainsi que des mesures de la variabilité spatiale des propriétés hydrauliques du sol dans les zones brûlées (Berli et al., 2008). Les résultats devraient établir une famille de fonctions hydrauliques du sol affectées par le feu pour différentes valeurs de chaque sol

Machine Translated by Google

mesure de la gravité des brûlures, qui peut ensuite servir de base à la modification de la théorie traditionnelle de l'infiltration.

4.3. Modification des théories traditionnelles d'infiltration

Deux composantes des théories traditionnelles d'infiltration doivent être prises en compte afin de modifier ces théories pour prédire l'infiltration après un feu de forêt. La première sera le développement des fonctions hydrauliques du sol affectées par le feu décrites ci-dessus, et la deuxième sera l'inclusion de plusieurs conditions spéciales liées aux feux de forêt. L'une des conditions est que les réponses après un feu de forêt sont caractéristiques et instables, de sorte que l'hypothèse de l'état stable n'est pas applicable. La deuxième est l'hypothèse du modèle d'infiltration de Green-Ampt (Green et Ampt, 1911) utilisé pour simplifier l'équation de Richards (Richards, 1931) selon laquelle le front d'humidification dans un sol est nettement défini par un sol uniformément humide au-dessus et un sol « sec » en dessous (Hillel, 1998). Cette hypothèse est parfois décrite comme une « onde de piston mobile » (Smith et al., 2002).

Français Les observations du front d'humidification des sols hydrofuges induits par le feu (DeBano, 1981) et d'autres sols hydrofuges (Dekker et Ritsema, 2000) ont indiqué une distribution irrégulière des parcelles de sol humides et « sèches » en fonction de la profondeur, ce qui suggère que le modèle de Green-Ampt pourrait ne pas être approprié pour les sols hydrofuges. Une troisième condition est que le ruissellement d'une parcelle hydrofuge peut s'infiltrer dans une autre parcelle en aval (Sheridan et al., 2007 ; Larsen et al., 2009). Cette variabilité dans la « couche » supérieure affectée par le feu peut être mieux caractérisée comme une fonction de distribution cumulative des propriétés hydrauliques du sol (Nachabe et al., 1997 ; Fiedler et Ramirez, 2000 ; Robichaud, 2000 ; Kinner et Moody, 2010). Français Cette approche a été intégrée à l'outil de gestion des risques d'érosion (ERMiT) en utilisant une distribution de conductivité hydraulique, qui peut également être variable spatialement sur une pente de colline modélisée (Robichaud et al., 2007a). Quatrièmement, l'augmentation de la quantité de sol nu après un feu de forêt rend les sols post-incendie susceptibles d'être imperméabilisés lors des tempêtes de pluie ultérieures par l'impact des gouttes de pluie et le ruissellement transportant des cendres et des particules fines de sédiments (Martin et Moody, 2001 ; Larsen et al., 2009 ; Woods et Balfour, 2010). Cette condition liée au feu peut compacter la couche supérieure du sol avec une augmentation correspondante de la densité apparente et un changement des fonctions hydrauliques du sol (Assouline, 2004). L'ampleur du processus d'imperméabilisation doit être mesurée, mieux comprise et intégrée dans les théories d'infiltration post-incendie de forêt, le cas échéant. Cinquièmement, des observations récentes de la teneur en eau du sol immédiatement après un feu de forêt et avant la première tempête de pluie importante après un feu de forêt ont documenté des conditions d'hyper-sécheresse avec un seuil de θ b ~0,02 cm3 cm−3 ou une succion matricielle > ~3 × 105 cm (Moody et Ebel, 2012a). Dans ces conditions, le seul processus disponible pour mouiller les sols est le processus lent de diffusion–adsorption (Moody et Ebel, 2012a). Pour caractériser adéquatement la réhumidification, les théories d'infiltration modifiées doivent considérer la réhumidification comme un processus en deux étapes par rapport à un seuil. Enfin, les conditions locales telles que les terriers d'animaux ou d'insectes, les racines d'arbres brûlées, les trous de souche et la teneur élevée en fragments rocheux peuvent fournir des voies de mégapores importantes pour l'infiltration à travers un sol hydrofuge autrement imperméable (par exemple Shakesby et al., 2007). Ces voies de mégapores (Fig. 7B) doivent être quantifiées et, si leurs effets sont importants, incorporées dans la théorie de l'infiltration post-incendie.

Français L'existence de « couches » de sol multiples et spatialement variables doit être prise en compte dans les modèles d'infiltration après incendie de forêt (Berli et al., 2008), et une conséquence immédiate est de décider comment déterminer l'épaisseur appropriée de chaque « couche » (Fig. 8). Dans le cas de la couche supérieure, cela nécessite de connaître la profondeur d'influence de la chaleur d'un incendie de forêt, qui peut pénétrer de quelques centimètres dans le sol (DeBano et al., 1976 ; Hungerford et al., 1996 ; DeBano et al., 1998 ; Robichaud et Hungerford, 2000 ; Stoof et al., 2011b) et modifier les propriétés du sol (Humphreys et Craig, 1981 ; Certini, 2005 ; Moody et al., 2005 ; Neary et al., 2005 ; Mataix-Solera et al., 2011). À l'heure actuelle, ces changements ne sont pas suffisamment bien quantifiés pour être utilisés dans

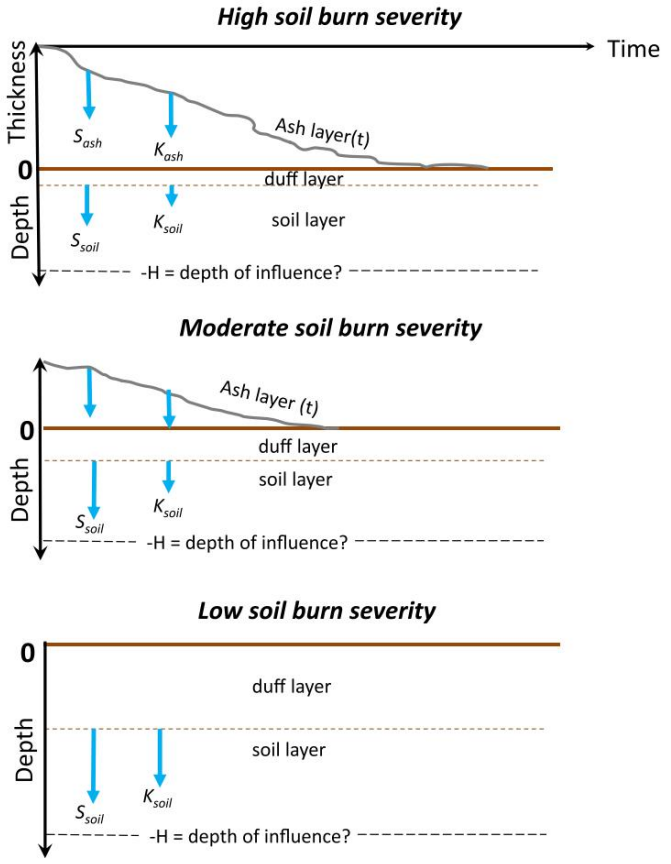

Fig. 8. Système de sol idéalisé à deux couches après un incendie de forêt avec une couche de cendres recouvrant le sol. L'épaisseur de la couche de cendre sus-jacente est proportionnelle à la quantité de matière brûlée et augmente avec le degré de gravité de la brûlure et diminue avec le temps en raison de l'érosion éolienne et hydrique. La couche de cendre est représentée comme étant uniforme dans ce diagramme, bien qu'en réalité son épaisseur varie spatialement. Les cendres et le sol ont des valeurs spécifiques de propriétés hydrauliques comme la sorptivité, S, et la conductivité hydraulique non saturée, K ainsi que des courbes de rétention d'eau du sol spécifiques. H représente une profondeur inconnue d'influence du système sur le ruissellement.

modèles d'infiltration post-incendie et de processus de ruissellement, de sorte que la collaboration avec les modélisateurs des effets du feu, qui ont développé des modèles tels que FOFEM (First Order Fire Effects Model, Campbell et al., 1995 ; Reinhardt, 2012) qui prédisent le profil de température du sol pendant différents comportements du feu et conditions de combustible (comme l'herbe, la canopée et la combustion lente), pourrait être très productive.

4.4. Mesures des propriétés hydrauliques du sol

Une méthode indirecte de détermination des propriétés hydrauliques du sol consiste à les résoudre en tant que paramètres de modèles théoriques qui expliquent le mieux les données observées. Ces modèles théoriques d'infiltration sont dérivés de l'équation différentielle partielle non linéaire de Richards (Richards, 1931 ; Philip, 1969) en faisant des hypothèses simplificatrices pour produire une forme analytique de l'équation qui peut être facilement résolue. Les propriétés hydrauliques du sol ne sont donc pas des mesures indépendantes, mais dépendent plutôt des hypothèses simplificatrices du modèle.

Ces modèles ont généralement été développés pour des sols agricoles relativement dépourvus de roches et peuvent ne pas s'appliquer aux sols rocheux et montagneux communs à de nombreuses zones brûlées ou à tout sol soumis à la chaleur. La propriété fondamentale de l'équation de Richards est la conductivité hydraulique, K [LT], qui contrôle la composante gravitaire de l'infiltration sur des échelles de temps allant de quelques heures à quelques jours. Une méthode de mesure de la conductivité hydraulique saturée, Ks, consistait à ajuster Ks dans un modèle de ruissellement hydrologique pour l'adapter aux hydrogrammes observés (Yates et al., 2000), et une autre consistait à résoudre Ks indirectement en utilisant le modèle Hydrus 1-D (Šimùnek et al., 2008).

Machine Translated by Google

Français en utilisant les taux d'infiltration intra-orage réels mesurés pendant les précipitations naturelles (Moody et Ebel, 2012b). Philips (1969) a dérivé une solution approximative pour la profondeur d'infiltration cumulative, I(t) [L], comme un développement en série de puissance dans le temps, t [T], qui est fréquemment tronqué à I(t) = S t1/2 + Kst, où S [L T1/2] est appelé la sorptivité et peut être considéré comme une deuxième propriété hydraulique qui contrôle la composante capillaire de l'infiltration sur des échelles de temps courtes de minutes à heures selon la texture du sol (White et Sully, 1987 ; Smith et al., 1999). Par conséquent, la sorptivité des sols affectés par le feu peut être initialement plus importante que la conductivité hydraulique saturée à l'échelle de temps des précipitations convectives, qui est généralement courte et ne dure que 20 à 60 minutes mais courante dans de nombreux domaines de réponse après un incendie de forêt. La sorptivité est un indicateur intéressant de l'infiltration après un feu de forêt, mais il ne s'agit pas d'une valeur unique comme Ks. Il s'agit plutôt d'une fonction de la teneur en eau du sol. Il est nécessaire de mesurer davantage la distribution spatiale de Ks et S ainsi que les changements temporels de ces propriétés après un feu de forêt. Les algorithmes de distribution cumulative peuvent fournir un moyen de quantifier la variabilité spatiale inhérente associée à ces conditions de pente et de surface (Robichaud, 2000 ; Kinner et Moody, 2010). Cependant, à l'heure actuelle, les quelques mesures existantes pour les sols affectés par le feu dépendent de la méthode de mesure et de la théorie utilisée.

Plusieurs méthodes plus directes ont été utilisées pour mesurer les propriétés hydrauliques du sol. La plupart mesurent l'infiltration cumulative, I(t), et se concentrent sur la mesure de Ks, qui peut s'étendre sur plusieurs ordres de grandeur (10−5 à 101 mm h−1 Rawls et al., 1982). L'inconvénient de la plupart des méthodes est qu'elles utilisent un certain type d'humidification artificielle du sol dans des conditions constantes (Moody et Ebel, 2012b) appliquée à une petite surface (~1 m2) sur le terrain (Robichaud, 2000) ou à des échantillons reconstitués en laboratoire (Fox et al., 2007 ; Novák et al., 2009). Français Les méthodes les plus courantes sont les dispositifs à charge constante ou à pression positive tels que l'anneau, le goutte-à-goutte, la charge tombante (Nimmo et al., 2009) et le perméamètre à disque ou les simulateurs d'intensité de pluie constante (Robichaud, 2000; Martin et Moody, 2001; Pierson et al., 2001; Assouline, 2004; Kinner et Moody, 2008, 2010). Les méthodes à pression positive (charge de 12,7 mm, Parks et Cundy, 1989; charge de 10 mm, Sheridan et al., 2007; charge de 5 mm, Nyman et al., 2011) poussent essentiellement l'eau dans le sol et peuvent submerger les facteurs contrôlant l'infiltration après un feu de forêt, en particulier si Ks est proche de zéro. Français Par conséquent, ces méthodes tendent à produire des estimations élevées de Ks (Cerdà, 1996; Nyman et al., 2010; Ebel et al., 2012) qui sont probablement inexactes étant donné les valeurs relativement faibles de Ks pour la plupart des sols affectés par le feu (100 – 102 mm h−1 ; Imeson et al., 1992; Robichaud, 2000; Yates et al., 2000; Martin et Moody, 2001; Rulli et al., 2006; Robichaud et al., 2007b; Moody et al., 2009; Neary, 2011; Nyman et al., 2011; Ebel et al., 2012). Français Les infiltromètres à tension éliminent le problème de pression positive (Robichaud et al., 2008c ; Moody et al., 2009), mais sont souvent difficiles à interfacer avec les sols grossiers de montagne caractéristiques de certains domaines de réponse après un feu de forêt. Les simulateurs de précipitations utilisent souvent une intensité de pluie unique et irréaliste (Kinner et Moody, 2010), et les distributions de taille des gouttes, les énergies cinétiques ou les variations temporelles ne sont pas représentatives de la pluie naturelle (Renard, 1985). Les quelques valeurs disponibles de sorptivité pour les sols affectés par le feu ont été mesurées à l'aide d'un infiltromètre à tension (Mini Disk, Decagon, 2006) et vont de 4,5 à 49 mm h−0,5 (Moody et al., 2009 ; Ebel et al., 2012). Français À titre de comparaison, cette plage est légèrement inférieure à la plage (21–73 mm h−0,5) pour les sols à texture sableuse ou argileuse « secs » non brûlés (tableau 8.1 ; Smith et al., 2002), mais similaire à celle des sols de terrain non perturbés (10–36 mm h−0,5, White et Sully, 1987). Si nous supposons que des fonctions hydrauliques du sol ont été développées pour les sols touchés par le feu et que la théorie de l'infiltration a été modifiée pour tenir compte des conditions spéciales des sols touchés par le feu (toutes deux discutées ci-dessus), alors la question suivante est : laquelle des méthodes ci-dessus est la plus appropriée pour mesurer la variabilité spatiale et temporelle de Ks et S sur le terrain ? De toute évidence, une méthode standard doit être adoptée pour que les mesures effectuées dans différents domaines de réponse post-incendie soient comparables.

4.5. Problème de dépendance temporelle

Français Certaines méthodes existantes utilisées pour prédire le moment et l'ampleur du ruissellement et de l'érosion tiennent compte de la variabilité spatiale des conditions de gravité des incendies à l'échelle des pentes (Robichaud et al., 2007c), mais pas des changements temporels au cours d'une tempête donnée (Robichaud, 2000 ; Robichaud et al., 2007a). Un indice de répulsion de l'eau a été proposé (Pierson et al., 2001, 2008) pour caractériser l'infiltration réduite après un feu de forêt, mais un tel indice n'a été considéré que comme fonctionnant de manière statique dans un modèle (Robichaud et al., 2007a). De même, les fonctions hydrauliques du sol représentent souvent des conditions d'équilibre trouvées en laboratoire, alors que des conditions dynamiques existent sur le terrain, ce qui pourrait modifier ces relations (Wang et al., 1997 ; Hassanizadeh et al., 2002 ; Scheuermann, 2008). Une meilleure compréhension des changements à court terme des propriétés hydrauliques du sol causés par l'humidification et l'assèchement lors des orages et par le gel et le dégel saisonniers du sol (lorsque les températures hivernales sont suffisamment basses) permettra d'améliorer les modèles de prévision post-incendie utilisés par les équipes d'évaluation des zones brûlées, les gestionnaires des terres et les intervenants d'urgence. De plus, à l'heure actuelle, les modèles prédictifs utilisent les précipitations efficaces, qui sont calculées comme le taux de précipitations (facile à mesurer mais difficile à prévoir) moins le taux d'infiltration (difficile à mesurer et à prévoir). Il est donc essentiel de comprendre le processus d'infiltration dans les bassins brûlés sur des échelles de temps appropriées afin de comprendre les précipitations efficaces en fonction du temps. Cette nouvelle compréhension peut être utilisée pour améliorer encore les modèles prédictifs du ruissellement et de l'érosion post-incendie.

4.6. Orientations futures de la recherche

La caractérisation des effets des feux de forêt sur les propriétés hydrauliques des sols est essentielle pour comprendre l'infiltration, le ruissellement et l'érosion et pour améliorer les modèles post-feux de forêt. Les questions de recherche prioritaires sont les suivantes :

(1) Quelles sont les relations quantitatives entre les paramètres de gravité des brûlures, tels que ΔNBR, WDPT, MED et 1VOL, et les propriétés hydrauliques du sol telles que Ks et S ? Une fois ces relations établies, les chercheurs peuvent définir un ensemble de fonctions hydrauliques du sol pour les sols affectés par le feu, à utiliser comme un élément pour modifier les théories traditionnelles d'infiltration.

(2) Quelle est l'importance relative des conditions liées au feu (effets du feu), telles que la variabilité spatiale du front de mouillage, le processus de diffusion-adsorption, l'étanchéité du sol, les voies d'écoulement préférentielles des mégapores, les multiples « couches » de sol et de cendres et la profondeur de pénétration du chauffage ?

(3) Comment les effets dynamiques des changements des propriétés hydrauliques du sol peuvent-ils être intégrés dans les modèles d'infiltration post-incendie ? Cela est nécessaire pour répondre aux besoins de prévision de la communauté post-incendie.

5. Ruissellement : établir un lien entre les précipitations et la morphologie du bassin et la réponse post-incendie

5.1. Contexte

Les hydrogrammes post-incendie sont difficiles à prévoir en raison de l'insuffisance des données sur les propriétés du sol (voir la section 4) et du manque de données sur les précipitations et le ruissellement pour les bassins brûlés, qui ne sont généralement pas vieillis (Moody et al., 2008a). Les hydrogrammes post-incendie sont également difficiles à mesurer car les élévations du lit des cours d'eau changent souvent rapidement en réponse à l'érosion et aux dépôts, et les débits post-incendie peuvent endommager l'instrumentation.
Par conséquent, une grande partie de la littérature de recherche hydrologique s'est concentrée sur la prévision du débit de pointe des inondations après incendie de forêt en utilisant la méthode des paléoinondations (par exemple Jarrett et England, 2002), la méthode des nombres de courbes (Hawkins et Greenberg, 1990 ; Cerrelli, 2005 ; Foltz et al., 2009), ou des mesures directes à partir de bassins brûlés (Moody et Martin, 2001a ; Moody et al., 2008a ; Foltz et al., 2009 ; Kean et al.,

Machine Translated by Google

2011 ; Moody, 2012), mais peu d'études se sont intéressées à la prévision du moment des inondations par rapport aux précipitations (Elliot et al., 2010).

Français La plupart des méthodes de prévision des précipitations et du ruissellement ont été développées pour les bassins non brûlés, pour lesquels il existe un volume important de littérature (par exemple Hawkins, 1973 ; Interagency Advisory Committee on Water Data, 1981 ; NRCS, 1986 ; Beven, 2000 ; Feldman, 2000 ; Ries et Crouse, 2002). L'accent dans cette étude est mis sur le processus de précipitations et de ruissellement, mais le ruissellement dû à la fonte des neiges provenant des zones brûlées peut avoir un impact sur la qualité de l'eau, mais n'entre pas dans le cadre de cette étude. En général, les méthodes de prévision des précipitations et du ruissellement supposent des précipitations uniformes dans le temps et dans l'espace (ce qui n'est généralement pas applicable aux zones brûlées en terrain montagneux) et des contributions du ruissellement au débit du canal à partir de l'ensemble de la zone du bassin versant (ce qui est également discutable). Deux méthodes fréquemment utilisées sont (1) les équations de régression régionales et (2) la méthode des nombres de courbes (Foltz et al., 2009). Les deux méthodes nécessitent un certain type de modèle de routage des chenaux (par exemple Peckham et al., 2004 ; Peckham, 2008 ; HEC-RAS, 2012) pour prédire l'hydrogramme. La première méthode nécessite de connaître ou de supposer l'augmentation du ruissellement après un incendie de forêt afin de calculer un « modificateur » des effets du feu, ce qui est malheureusement essentiellement ce que la méthode vise à prédire. Les deux méthodes ont des difficultés à prendre en compte les effets du feu. L'utilisation de la méthode des nombres de courbes pour les zones brûlées a produit des résultats contradictoires et démontre la nécessité de recherches supplémentaires selon Springer et Hawkins (2005).

Français Tout modèle de ruissellement doit comporter un sous-modèle capable de prédire l'infiltration après un incendie de forêt (voir la section 4) et la contribution du ruissellement des pentes aux chenaux. Selon le domaine de réponse après un incendie de forêt, les processus générateurs de ruissellement des pentes peuvent basculer entre un écoulement de surface avec infiltration et un écoulement de surface avec saturation (Dunne, 1978 ; Wondzell et King, 2003 ; Keizer et al., 2005 ; Onda et al., 2008 ; Ebel et al., 2012). Les proportions intra-orageuses des deux processus générateurs de ruissellement varient sur les pentes abruptes des collines du sud de la Californie (Schmidt et al., 2011), et il est possible qu'elles changent sur des intervalles plus longs que les orages individuels. Il a été constaté que la génération de ruissellement par excès d'infiltration est plus sensible à l'incertitude associée aux précipitations que par excès de saturation (Winchell et al., 1998).

Comprendre comment ces processus fonctionnent après les incendies de forêt est essentiel pour prévoir le ruissellement et les inondations.

5.2. Facteurs affectant le ruissellement après un incendie de forêt

Français Les explications de l'augmentation du ruissellement après un feu de forêt peuvent être regroupées en trois hypothèses : (1) une infiltration réduite causée par la répulsion de l'eau du sol (SWR), (2) une augmentation des vitesses d'écoulement et de la connectivité résultant de l'augmentation du pourcentage de sol nu, et (3) une infiltration réduite causée par l'étanchéité du sol et l'emprisonnement d'air. L'importance de la SWR dans la promotion du ruissellement et de l'érosion a été identifiée pour la première fois par Krammes et Osborn (1969). Ils ont attribué l'érosion accrue à une diminution de l'infiltration et à des changements dans les propriétés hydrauliques du sol. Cependant, l'impact de la répulsion de l'eau n'a pas été isolé pour des conditions de terrain à grande échelle (Shakesby et al., 2000), et aucune relation mathématique n'a été proposée pour relier le degré de SWR au ruissellement. Français L'hypothèse dite du sol nu semble avoir son origine dans l'article de Cerdà (1998b, figure 5), qui a lié le ruissellement après un incendie de forêt au pourcentage de couverture végétale, et des liens ultérieurs ont été démontrés entre le pourcentage de sol nu et le ruissellement en utilisant des simulations de précipitations (Johansen et al., 2001 ; Pierson et al., 2009), des expériences en laboratoire (Pannkuk et Robichaud, 2003) et des preuves indirectes basées sur l'augmentation de l'érosion des sédiments (Benavides-Solario et MacDonald, 2005) et la formation de rigoles (Berg et Azuma, 2010) pour les précipitations naturelles.

Une augmentation de la surface du sol nu entraîne également une augmentation de la connectivité des parcelles de sol hydrofuges (Shakesby et al., 2000 ; Doerr et Moody, 2004 ; Cawson et al., 2010 ; Nyman et al., 2010). Un seuil possible de 60 à 70 % de sol nu s'est avéré lié à la connectivité des parcelles nues (Johansen et al., 2001) et semble expliquer une grande partie de l'érosion post-incendie causée par l'augmentation du ruissellement. L'hypothèse de l'imperméabilisation du sol est née de l'article de Rowe (1948). Le rôle des cendres dans l'étanchéité a été proposé par Mallik et al. (1984), et l'hypothèse combinée, qui attribue l'étanchéité aux précipitations (étanchéités structurelles ; Assouline, 2004) et au ruissellement (étanchéités sédimentaires ; Onda et al., 2008 ; Cerdà et Robichaud, 2009 ; Stoof et al., 2010 ; Woods et Balfour, 2010), a été suggérée par Martin et Moody (2001), et testée par Larsen et al. (2009). Des expériences en laboratoire et sur le terrain ont montré que le piégeage de l'air (Jarrett et Fritton, 1978 ; Wang et al., 1997, 1998) peut diminuer les taux d'infiltration (Krammes et DeBano, 1965 ; Suhr et al., 1984) et donc augmenter le ruissellement.

Il est possible que diverses combinaisons de ces hypothèses soient importantes dans l'ensemble des domaines post-incendie. Plusieurs facteurs de ruissellement (seuils critiques, zone contributive, stockage dans les dépressions, rugosité hydraulique et connectivité entre les pentes et les écoulements des canaux) liés à ces hypothèses peuvent éventuellement influencer le ruissellement post-incendie en plus des effets du feu sur les propriétés hydrauliques du sol (voir la section 4) et les caractéristiques des orages (voir la section 3 et Dunne, 1978).

Ces facteurs de ruissellement sont pris en compte dans les sous-sections suivantes.

5.2.1. Seuils critiques

Les effets du feu ont tendance à réduire la conductivité hydraulique saturée et la sorptivité en dessous des valeurs antérieures à l'incendie, ce qui peut entraîner l'apparition de seuils critiques d'intensité des précipitations contrôlant le ruissellement après un incendie de forêt.
De plus, les cendres de surface et les couches de sol affectées par le feu peuvent entraîner un seuil critique de profondeur de pluie associé soit à un écoulement de surface par excès de saturation, soit à un écoulement de surface par excès d'infiltration (Onda et al., 2008 ; Kirkby, 2011).
Français Les seuils de ruissellement peuvent être liés à la connectivité des voies d'écoulement, et les effets de la connectivité souterraine ont été étudiés à l'aide de la théorie de la percolation (Lehmann et al., 2007). La littérature sur les interventions après un incendie de forêt a établi des seuils d'intensité des précipitations (Fig. 9), au-delà desquels les débits de pointe des zones brûlées augmentent considérablement (Doehring, 1968 ; Moody et Martin, 2001a ; Reneau et Kuyumjian, 2004 ; Kunze et Stednick, 2006 ; Moody et al., 2008a ; Moody, 2012), et un seuil d'intensité et de durée des précipitations au-delà duquel des coulées de débris destructrices de différentes ampleurs peuvent être attendues (Cannon et al., 2008, 2011 ; Staley et al., 2012). La séquence et le moment des orages peuvent également influer sur la réponse post-incendie (Germanoski et al., 2002 ; Moody et al., 2008b ; Kean et al., 2011), ce qui peut être lié à des seuils dépendants de l'échelle (Cammeraat, 2004 ; voir également la section 3) associés aux périodes sans pluie. Les chercheurs doivent donc comprendre comment ces seuils critiques fonctionnent à différentes échelles spatiales.

5.2.2. Zone contributive

Français Lors d'une tempête de pluie, la zone contributive ne coïncide probablement pas avec le bassin topographique (Beven et Kirkby, 1979). Les méthodes de prévision du débit de pointe supposent souvent la contribution de l'ensemble du bassin, uniquement de la zone brûlée, ou uniquement de la zone brûlée à intensité élevée ou modérée. La zone contributive réelle peut en fait ne pas être statique mais évoluer avec le temps et ce concept dynamique a servi de base aux concepts de zone partielle et de zone source variable développés pour les bassins non brûlés (Betson, 1964 ; Smith et Goodrich, 2000) et généralement utilisés pour prévoir l'écoulement de surface saturé-excédentaire. L'adoption d'une certaine forme du concept de zone partielle pourrait améliorer considérablement la compréhension de la génération d'infiltration-ruissellement excédentaire dans les zones brûlées avec des parcelles spatialement variables ayant une gamme de propriétés hydrauliques du sol affectées par le feu (Sheridan et al., 2007). Par exemple, le taux d'augmentation de la surface contributive dans les zones semi-arides (qui pourraient être considérées comme des substituts des zones brûlées en raison de la quantité de sol « nu ») a tendance à être élevé pour les courtes distances de déplacement, mais a tendance à être plus faible pour les distances de déplacement plus longues car la probabilité de rencontrer des zones à forte capacité d'infiltration augmente (Jackson et Roering, 2009 ; Kirkby, 2011). Cette variabilité spatiale a été représentée par plusieurs types de fonctions de distribution cumulative (Hawkins, 1982 ; Kinner et Moody, 2010), qui peuvent fournir une moyenne spatiale d'une valeur effective des propriétés hydrauliques du sol. Le ruissellement commence lorsque l'intensité des précipitations dépasse cette moyenne spatiale effective. De plus, certaines méthodes de prévision du ruissellement simulent

Machine Translated by Google

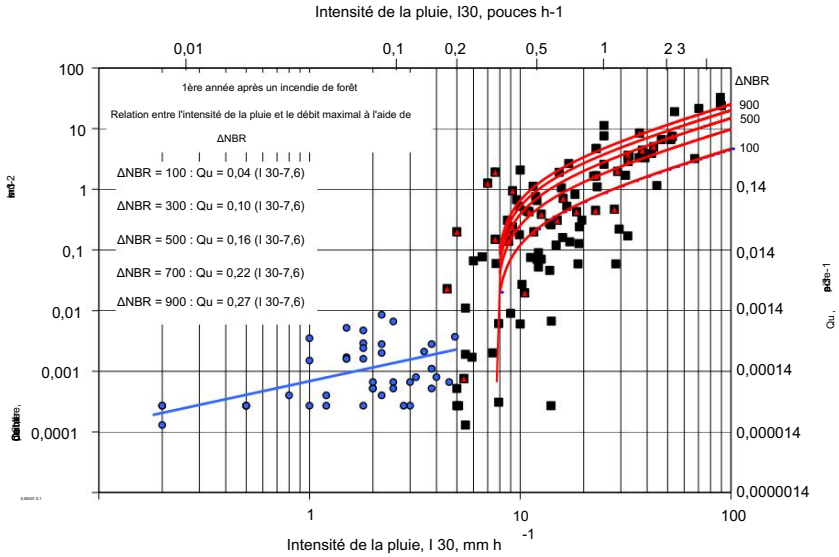

Fig. 9. Relation entre le débit de pointe par unité de surface brûlée (Qu) et l'intensité maximale des précipitations sur 30 minutes, I30, pour des données appariées de précipitations et de ruissellement provenant de 19 bassins montagneux dans différents domaines de réponse après un incendie de forêt dans l'ouest des États-Unis. La relation est basée sur des données provenant de bassins dont la taille varie de 0,25 à 25 km2. Les données indiquent un seuil de précipitations I30 distinct, qui est de 7,6 mm h−1 (sur la base des résultats de la première année après un incendie de forêt). Les cercles bleus pleins représentent le maximum I30 b 5 mm h−1 et correspondent aux cours d'eau pérennes. Les valeurs maximales I30 > 5 mm h−1 sont représentées par des carrés noirs et correspondent généralement à des canaux éphémères. Les triangles rouges représentent les bassins ayant une valeur moyenne du changement du taux de brûlage normalisé, ΔNBR = 581 ± 5 %. Les lignes rouges correspondent à la relation pour ΔNBR = 100, 300, 500, 700 et 900. Voir le rapport de Moody (2012) pour plus de détails. (Pour l'interprétation des références à la couleur dans la légende de cette figure, le lecteur est renvoyé à la version Web de cet article.)

Français la microtopographie spatialement variable ainsi que l'infiltration des précipitations pour un écoulement de surface peu profond (Fiedler et Ramirez, 2000). La fonction de connexion de surface relative (RSC) détermine le pourcentage du stockage de la dépression (Fig. 7, et voir 5.2.3 ci-dessous) contribuant à l'exutoire (Antoine et al., 2011). Les zones contributives, comme les zones sources pour l'initiation du chenal, dépendent probablement aussi de la pente topographique (Montgomery et Dietrich, 1988 ; Dietrich et al., 1992), qui peut être très variable en terrain montagneux. Toutes les variables contrôlant la taille de la zone contributive (Fig. 10) pendant un orage ne sont pas encore claires, mais il est raisonnable de supposer qu'elle dépendra : (1) de l'intensité des précipitations ; (2) de l'« empreinte » de l'orage correspondant (voir Section 3) ; (3) les dépressions et les cuvettes topographiques représentant des « trous » dispersés dans la zone contributive, (4) la zone et le degré de gravité de la brûlure, et (5) la trajectoire et le profil de la tempête (voir la section 3).

5.2.3. Stockage dans les dépressions et rugosité de la

surface Le stockage dans les dépressions peut augmenter après des feux de forêt dans certaines zones forestières en raison de la création de trous de souches et de racines brûlées (Fig. 7B et 10), et par le déplacement des racines des arbres pendant ou immédiatement après un feu de forêt (Gallaway et al., 2009). Certains de ces trous pourraient représenter un stockage supplémentaire dans les dépressions qui pourrait créer un seuil de ruissellement supplémentaire similaire à l'hypothèse de remplissage et de déversement pour l'écoulement souterrain (Tromp-van Meerveld et McDonnell, 2006). Cette situation contribuerait au ruissellement à différents moments (Antoine et al., 2011). D'un autre côté, certains trous pourraient représenter des voies d'écoulement distinctes pour l'infiltration (voir la section 4) et ainsi réduire le ruissellement potentiel (par exemple, Ferreira et al., 2005 ; Martin et al., 2008). Ces effets n'ont pas encore été quantifiés de manière adéquate et doivent être traités.

La rugosité de surface est une propriété à petite échelle, mais elle est importante car elle contrôle le ruissellement sur les pentes et dans les canaux par le biais du paramètre de résistance au frottement. La rugosité de surface peut changer après un incendie de forêt par la consommation de végétation, de litière et d'humus, et d'obstacles de surface (tels que des branches, des bûches et des tiges de plantes), et par le dépôt d'une couche de cendres d'épaisseur variable. La rugosité de surface après un incendie de forêt peut sembler plus lisse (Fig. 7C) et mieux connectée que pour les conditions d'avant l'incendie à l'échelle de la pente (~10–100 m), mais l'écoulement de surface est toujours contrôlé par la grande rugosité relative (rapport des hauteurs micro-topographiques, d [L], à la profondeur d'écoulement ou au rayon hydraulique,

Français R [L], Smart et al., 2002) à l'échelle du point-plot (~0,1–1 m). La relation entre le facteur de frottement (facteur de frottement n de Manning ou de Darcy-Weisbach, f) a été étudiée dans les canaux (Nikora et al., 2001) et sur certaines pentes de collines non brûlées (Lawrence, 1997) où f ~(d/R)2 pour une rugosité relative faible change en f ~R/d pour une rugosité relative élevée sur les pentes de collines (Lawrence, 1997). Étonnamment, peu d'études (cf. Rulli et Rosso, 2005 ; Wagenbrenner et al., 2010) sur les effets des feux de forêt sur le frottement de surface ont été publiées. Les progrès récents en matière de LiDAR terrestre et aéroporté continuent d'améliorer la résolution du modèle numérique d'élévation (MNE), de sorte que l'importance du stockage des dépressions et des changements de rugosité de surface puisse être mieux comprise grâce à des recherches futures (Staley et al., 2010).

5.2.4 Connectivité des zones de production d'eau de ruissellement

Des parcelles de sol de différentes tailles et propriétés hydrologiques, associées à des dépressions dispersées, des souches brûlées et des trous de racines, soulignent la nécessité de prendre en compte la connectivité spatiale du ruissellement de surface. Plusieurs publications ont commencé à aborder cette question. La fonction Relative Surface Connection (Antoine et al., 2011) calcule la proportion de stockage de dépression connectée à l'exutoire de drainage dérivée de l'intensité effective des précipitations (voir section 3), mais omet le stockage de rétention (c'est-à-dire l'eau supplémentaire s'écoulant à la surface).

Certains chercheurs ont exprimé ce concept comme l'échelle de longueur de connectivité (analogue à l'échelle de longueur de corrélation dans la turbulence, Batchelor, 1982) des schémas spatiaux des propriétés du sol telles que l'humidité du sol, dont la valeur dans un pixel est soit supérieure (+1) soit inférieure (0) à un seuil sélectionné (Western et al., 2001). Cette échelle de longueur peut être calculée pour des schémas isotropes ou le long d'un trajet d'écoulement pour fournir un « descripteur global de la variabilité spatiale », mais elle dépend de l'échelle (Western et al., 2001) et n'est pas conçue à l'origine pour le ruissellement (Mayor et al., 2008). D'autres chercheurs ont quantifié la connectivité des zones sources de ruissellement (pixels représentant le sol nu) en définissant un indice de « longueur d'écoulement » (Mayor et al., 2008) comme la longueur moyenne de tous les trajets d'écoulement potentiels sur la base d'une carte binaire des sources (pixels nus) et des puits (pixels végétatifs ou micro-dépressions) et d'un algorithme de direction d'écoulement unique. La « longueur d'écoulement » est corrélée au ruissellement total et au rendement total en sédiments et ces corrélations augmentent avec la taille de la tempête.

Bien que l'accent initial ait été mis sur la répartition de la végétation,

Machine Translated by Google

cette approche pourrait inclure la rugosité micro-topographique (selon
(selon la taille des pixels du DEM) causée par la survie après un incendie de forêt
monticules de plantes et probablement des trous de souches et de racines brûlés. Cawson
et al. (2010) ont mesuré l'effet de la longueur des zones non brûlées
en aval des zones brûlées, et Moody et al. (2008a) ont défini
la variable de connectivité fonctionnelle hydraulique basée sur le processus spécifiquement
pour les bassins brûlés. Cette variable intègre l'ampleur de la brûlure
gravité par des changements dans le rapport de brûlure normalisé (ΔNBR voir
Section 4) et la séquence spatiale de ΔNBR le long des trajectoires d'écoulement avec
pondération proportionnelle à la zone contributive en amont.

Seuils internes ou externes (Schumm, 1980 ; Davenport et al.,
1998; Cammeraat, 2004) sont importants pour établir la connectivité.
Ils se traduisent souvent par un changement brutal de la réponse du ruissellement.
soulignant le caractère non linéaire de cette réponse.
la recherche post-incendie doit examiner ces variables de connectivité,
et éventuellement d'autres, pour déterminer la meilleure façon de représenter l'hydraulique
propriétés de connectivité afin de prédire le ruissellement après un incendie de forêt
et l'érosion. Les progrès dans la modélisation de l'érosion basée sur les processus sont désormais
permettre à plusieurs éléments de pente de ruissellement de surface de capturer une partie de
la variabilité spatiale et la connectivité (Robichaud et al., 2007b),
mais il y a encore place à l'amélioration. De plus, les DEM sont facilement disponibles
ont tendance à avoir une résolution spatiale trop grossière (généralement 30 m pixels
mais parfois des pixels de 10 m) pour fournir une résolution suffisante des drainages et des
canaux des pentes des collines nécessaires à l'application de certaines de ces variables de
connectivité. Ainsi, une augmentation de la résolution du MNT est essentielle pour
contribuer à faire avancer cette question de la recherche post-incendie. Cependant, certains
modèles hydrologiques peuvent nécessiter une résolution inférieure à celle des données d'entrée,
et des procédures de mise à l'échelle (par exemple Milzow et Kinzelbach, 2010)
il serait nécessaire de fournir des variables de connectivité mesurées au niveau du tracé
ou échelle de pente pour une utilisation à l'échelle du bassin.

5.3. L'importance des propriétés géomorphiques

En général, la plupart des bassins brûlés ne sont pas traités avant un incendie de forêt, ce qui
souligne la nécessité de déterminer les caractéristiques géomorphiques importantes qui pourraient
être utilisées pour prédire le moment et l'ampleur du ruissellement
immédiatement après un incendie de forêt. Ces caractéristiques peuvent être dérivées de
Les DEM sont facilement intégrés dans les modèles de réponse du bassin. En règle générale,
Les grands incendies de forêt aux États-Unis ne s'étendent pas en moyenne sur plus de 103 km2
(NIFC, 2011) et dans le sud de l'Europe, ils sont généralement beaucoup plus petits
(par exemple Commission européenne, 2012). À cette échelle, la morphologie détaillée d'un
bassin brûlé, ses pentes, ainsi que les réseaux de drainage de la vallée (Fig. 7C) pourraient tous
influencer le moment, la forme et l'ampleur
des hydrogrammes de crue ou de coulée de débris (Kirkby, 1976; Sun et al.,
(1994; Dick et al., 1997; Moody et Kinner, 2006; Kean et al., 2011).
Plus précisément, la morphologie des pentes et du drainage des canaux peut affecter la
hydrogramme unitaire instantané géomorphique (GIUH; Rodriguez-Iturbe)
et Valdes, 1979) utilisés dans les prévisions d'hydrogrammes de crue (D'Odorico
et Rigon, 2003). À l'heure actuelle, cependant, les informations incorporées dans
la théorie GIUH se limite à connaître la pluviométrie effective (voir
Section 3) et suppose la même vitesse de ruissellement constante dans les réseaux de drainage
des pentes des collines que dans les canaux. Cela nécessite des calculs irréalistes
rugosité uniforme ou facteurs de frottement. Comme décrit dans le précédent
section, des informations supplémentaires sont nécessaires pour paramétrer les changements spatiaux
dans la rugosité de surface, ce qui conduirait à l'incorporation de vitesses variables dans les
modèles et à de meilleures prévisions du temps jusqu'au pic et de la
débit de pointe. Une autre approche a consisté à évaluer statistiquement
combinaisons multivariées de caractéristiques géomorphiques de bassins plus vastes
(tels que le rapport de relief, la rugosité du bassin et les gradients du bassin) comme prédicteurs
de la probabilité de coulées de débris après un incendie de forêt et de coulées de débris
volumes (Cannon et al., 2010).

5.4. Orientations futures de la recherche

Le ruissellement après un incendie de forêt se produit principalement dans des bassins non vieillis et
En général, seules des relations empiriques sont disponibles pour prédire les crues de pointe
décharges et peu d'informations sont disponibles pour prédire quand
une inondation va commencer. La théorie d'infiltration modifiée (voir section 4) doit
à inclure dans les prévisions de ruissellement afin d'améliorer les estimations de
la pluviométrie effective utilisée dans la plupart des modèles pluie-ruissellement.

Les questions de recherche prioritaires supplémentaires concernant le processus de ruissellement sont les suivantes :

(1) Quels sont les effets de la connectivité et de la rugosité de surface sur
ruissellement après un incendie de forêt ? Comment doivent-ils être paramétrés et
Comment sont-ils liés à la distribution spatiale de l'hydraulique du sol
propriétés (section 4), stockage en dépression et propriétés géomorphiques des réseaux
de drainage à l'échelle des pentes et éventuellement des bassins ?

(2) Comment la zone contributive change-t-elle en fonction des caractéristiques des
précipitations (Fig. 10) pour différents domaines de réponse post-incendie, et
quels seuils de ruissellement pourraient être liés à la contribution
zone?

(3) À quelles échelles se situent les caractéristiques géomorphiques du drainage
Les modèles sont-ils importants pour prédire le ruissellement après un incendie de forêt ?

(4) Quelles sont les causes physiques sous-jacentes, dépendantes de l'échelle, des seuils de
précipitations qui affectent le moment et l'ampleur des différents
processus post-incendie ? Ces causes sont nécessaires pour
permettre la généralisation et le transfert des résultats à d'autres programmes post-incendie
domaines.

6. Érosion et transport des sols et des sédiments

6.1. Contexte

La variabilité des réponses à l'érosion après un incendie de forêt est causée par des
différences dans les processus de ruissellement, d'érosion et de transport qui opèrent
dans un domaine donné. Par exemple, il existe des domaines post-incendies
comme le terrain relativement plat de la forêt marécageuse d'épinettes d'Alaska qui
peuvent ne produire aucune réponse, tandis que d'autres, comme le terrain escarpé et
tectoniquement actif de la forêt de chaparral de Californie, peuvent produire
coulées de débris catastrophiques. La spécificité des réponses n'est pas causée

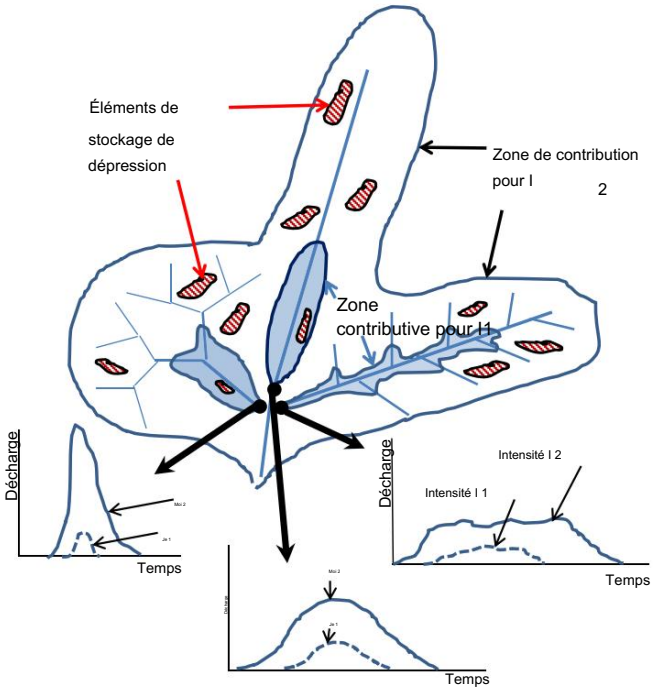

Fig. 10. Un diagramme conceptuel montrant comment le modèle morphologique de drainage
les réseaux dans les canaux et sur les pentes des collines (non représentés) peuvent affecter le moment et
valeurs maximales des hydrogrammes de ruissellement. Trois sous-bassins sont représentés avec différentes
morphologies. La question se pose de savoir quelle mesure de précipitations doit être utilisée (voir Fig. 2).
Les hydrogrammes d'écoulement se rapportent à deux intensités de pluie différentes, I1 (ligne pointillée) b I2
(ligne continue) et les zones contributives correspondantes sont étiquetées.

Machine Translated by Google

Les variations de pente ne sont pas uniquement dues aux différences de pente topographique, mais sont des réponses complexes (Schumm, 1973) à la variabilité temporelle et spatiale des sols affectés par le feu (section 4), les précipitations (section 3), l'infiltration (section 4) et le ruissellement (section 5). Ces processus sont souvent caractérisés par des seuils qui conduisent à des non-linéarités dans la réponse à l'érosion. Français Les seuils peuvent être externes (Schumm, 1979 ; Cammeraat, 2004) comme celui de l'infiltration-ruissellement excessif et ceux de l'intensité des précipitations associées au débit de pointe (voir la section 5.2.1) ou ils peuvent être internes (Schumm, 1979 ; Cammeraat, 2004) comme le seuil de température relativement abrupt d'environ 220 °C, qui contrôle l'ampleur de la contrainte de cisaillement critique requise pour initier l'érosion (Moody et al., 2005), la consommation des racines fines qui maintiennent souvent le sol et les agrégats du sol ensemble (Mataix-Solera et al., 2011), la granulométrie du sol (c'est-à-dire la quantité de fines) et le gradient critique nécessaire pour initier l'effilochage à sec (Roering et Gerber, 2005). Une complexité supplémentaire est causée par la non-uniformité de la distribution spatiale des sources de sédiments, où des impulsions soudaines de sédiments ou d'eau peuvent modifier le processus de transport à chaque confluence d'affluents en aval (Santi et al., 2008), et les processus de rétroaction où le transport de sédiments sur les pentes des collines peut modifier la rugosité de la surface, provoquant des changements dans les schémas de ruissellement et le transport de sédiments (Imeson et al., 1992 ; Kirkby, 2011).

Français Les variables clés des réponses à l'érosion après un incendie de forêt sont le ruissellement et la disponibilité des sédiments. Les explications de l'augmentation du ruissellement après un incendie de forêt sont discutées ci-dessus (section 5.2). La disponibilité des sédiments désigne l'apport de sédiments (sa quantité) et son érodibilité (sols cohérents) ou sa mobilité (sédiments non cohérents) associée. L'érodibilité du sol dépend du processus d'érosion spécifique, a été mesurée principalement pour des sols agricoles relativement homogènes, mais est rarement constante (Bryan, 2000). Dans le contexte d'un terrain sujet aux incendies avec des sols hétérogènes, l'érodibilité peut être particulièrement variable en réponse aux changements causés par le réchauffement pendant les incendies de forêt et aux changements intra- et inter-orages des conditions d'humidité du sol après les incendies de forêt. Français La profondeur du sol, les changements des propriétés du sol induits par la chaleur, comme la contrainte de cisaillement critique (Florsheim et al., 1991 ; Moody et al., 2005) et la stabilité des agrégats du sol (Mataix-Solera et al., 2011), le rapport ROS (Doerr et al., 2000, 2009) peuvent également entraîner des différences, tout comme les caractéristiques des racines (Gyssel et al., 2005 ; Shakesby et al., 2007 ; Moody et Nyman, 2012) (Fig. 11). La mobilité des sédiments non cohésifs dans les rigoles, les ravins et les canaux dépend de la contrainte de cisaillement critique pour initier le mouvement pour un diamètre de particule donné (Wiberg et Smith, 1987). Les théories traditionnelles pour une faible rugosité relative (rapport entre le diamètre des particules et la profondeur de l'écoulement) prédisent une augmentation de la mobilité des particules à mesure que la pente du canal augmente, mais il existe des preuves que la relation critique de contrainte de cisaillement diffère pour une grande rugosité relative (Lamb et al., 2008) et des pentes plus raides, typiques des inondations après un incendie de forêt dans les zones montagneuses.

En général, la plupart des modèles de prévision de l'érosion actuellement disponibles appliqués aux environnements forestiers ont évolué à partir de modèles développés à partir d'études parcellaires sur des sols agricoles en pentes à faible inclinaison (Bryan, 2000). L'applicabilité de ces modèles aux conditions post-incendie comporte donc des incertitudes distinctes (González-Bororino et Osterkamp, 2004) car les pentes sont souvent raides (Wagenbrenner et al., 2010), avec des propriétés hydrauliques du sol (voir la section 4) et des conditions de surface hétérogènes (voir la section 5). La complexité de ces réponses à l'érosion post-incendie a donné lieu à l'élaboration de modèles probabilistes de prévision (Robichaud et al., 2007b), qui nécessitent des informations sur l'érodabilité du sol post-incendie qui sont actuellement rarement disponibles. Compte tenu de cette complexité, il n'est pas surprenant qu'il soit difficile d'extraire des relations simples de cause à effet. En raison des nombreux types de processus d'érosion et de transport, un bref résumé de chaque processus est décrit ci-dessous.

6.1.1. Ravel sec

Ce processus dépend de la gravité, du vent et de l'activité animale plutôt que de l'eau pour détacher et transporter le sol (Anderson et al., 1959 ; Krammes, 1965 ; Rice, 1982 ; Florsheim et al., 1991 ; Gabet, 2003a ; Moody, 2010). Par conséquent, il est sensible à l'angle de repos ou au gradient critique (Roering et Gerber, 2005) et à la quantité de sédiments apportés sur le versant de la colline. Une partie des sédiments du ravel sec est piégée par

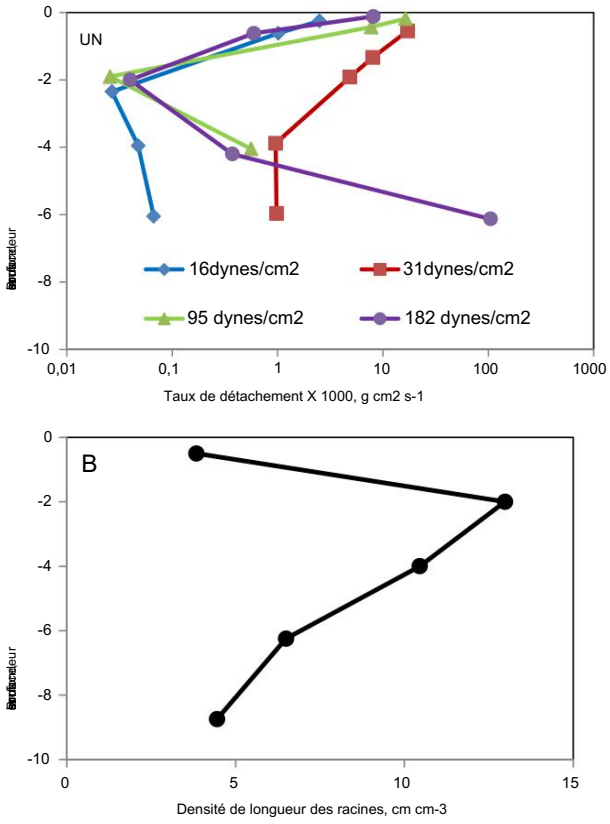

Fig. 11. (A) Les mesures du détachement du sol en fonction de la profondeur sous la surface du sol ont été effectuées dans un petit canal inclinable sur des carottes de sol avec une couche de cendres. Les carottes de sol ont été prélevées dans la zone brûlée par l'incendie de Fourmile Canyon en 2010. (B) Densité de longueur des racines représentée en fonction de la profondeur sous la surface du sol pour les mesures présentées en A (Moody et Nyman, 2012).

Français La végétation (Florsheim et al., 1991 ; Lamb et al., 2011), de sorte qu'elle est mobilisée lorsque la végétation est brûlée. Certains pensent que ce processus est la principale source de redistribution des sédiments sur les pentes des collines après un feu de forêt dans le sud de la Californie (Wohlgemuth et Hubbert, 2008 ; Lamb et al., 2011). Les sédiments mobilisés de cette manière peuvent atteindre directement le chenal et peuvent également servir de source de sédiments pour les coulées de débris. Ainsi, la connectivité accrue pendant la période de disponibilité des sédiments dans les chenaux tout en réduisant la disponibilité sur les pentes des collines. Elle a été modélisée pour les zones brûlées comme une fonction non linéaire du gradient de pente avec un coefficient de taux de transport, k [L2 T−1], (Roering et Gerber, 2005 ; Rulli et Rosso, 2005). Français Là où les feux de forêt sont fréquents et l'érosion post-feu est élevée, le taux de production du sol devrait limiter l'épaisseur et la distribution du sol et donc l'ampleur du processus d'effritement sec (Roering et Gerber, 2005), mais d'autres recherches suggèrent que des taux de production de sol accrus ne sont pas nécessaires pour expliquer les pertes de sol substantielles par l'effritement sec induit par le feu après des feux de forêt successifs (Lamb et al., 2011). L'effritement sec peut mobiliser de grandes quantités de sédiments et, comme il est indépendant des précipitations, il occupe une position unique dans la compréhension de la réponse de l'érosion post-feu de forêt face aux températures plus élevées, à la sécheresse accrue et à davantage d'incendies de forêt prévus à l'avenir. Avec plus d'incendies de forêt et plus de personnes vivant dans des zones sujettes aux incendies où ce processus est courant, la nécessité de comprendre l'effritement sec est susceptible de gagner en importance.

6.1.2. Érosion par gouttes de pluie, écoulement pluvial et érosion entre les rigoles

L'impact des gouttes de pluie est l'un des processus de détachement les plus évidents et les plus efficaces (Gabet et Dunne, 2003). Il est important sur les pentes brûlées où la litière et l'humus ont initialement brûlé, exposant des zones inégales de sol nu, et plus tard lorsque la couche de cendres inégale a été

Machine Translated by Google

Les gouttes de pluie peuvent se combiner à un écoulement superficiel peu profond près du sommet des pentes pour créer un transport d'écoulement pluvial (Moss, 1988 ; Moody, 2010) qui peut se transformer en écoulement inter-rigoles ou en nappe plus en aval (Inbar et al., 1998 ; Moody et Martin, 2001c ; Benavides-Solario et MacDonald, 2005 ; Rulli et Rosso, 2005 ; Mayor et al., 2007 ; Sheridan et al., 2007). Le processus dépend de l'angle de la pente et a été modélisé à l'échelle des bassins brûlés en utilisant le coefficient d'érodibilité des gouttes de pluie κc [M−1 T2 L−2] (Rulli et Rosso, 2005). La composante de détachement de ce processus peut également dépendre de l'emprisonnement d'air (voir la section 5.2). Ce phénomène a été observé dans des canaux de laboratoire lorsque l'air emprisonné s'échappe de manière explosive, entraînant des particules de sol dans l'écoulement (Suhr et al., 1984 ; Moody et al., 2005 ; Moody et Nyman, 2012). Cependant, ce processus n'a pas été observé ni mesuré sur le terrain, de sorte que son ampleur et son importance sont inconnues.

Français L'effet combiné de l'érosion par les gouttes de pluie, entre les rigoles et en rigoles peut être estimé à partir de l'équation universelle de perte de sol en utilisant le facteur K d'érodibilité du sol en vrac [L−3 T3] (voir la section 2.3), basé sur le rendement total des sédiments par unité de pluie indice d'érosion à partir de parcelles standard (Wischmeier et Smith, 1978). L'érodibilité entre les rigoles, seule, a été modélisée en supposant que l'érosion est proportionnelle à l'intensité des précipitations avec une érodibilité égale à Ki [MT L−4], (Foster et al., 1995). La raison pour laquelle l'érosion entre les rigoles ou le ruissellement en nappe domine dans un domaine post-incendie de forêt (Fig. 12A) et l'érosion en rigoles dans un autre (Fig. 12B) peut dépendre des changements induits par le feu dans l'érodibilité du sol et peut être affectée par les propriétés des racines (Sheridan et al., 2007 ; Moody et Nyman, 2012).

6.1.3. Érosion en

rigoles Sur certains versants de collines après un feu de forêt, l'érosion entre rigoles ou en nappe domine (Sheridan et al., 2007) alors que sur d'autres, c'est l'érosion en rigoles qui domine (Moody et Martin, 2001c; Robichaud et al., 2010; Wagenbrenner et al., 2010; Kean et al., 2011). L' érodibilité en rigoles a été modélisée en supposant que l'érosion dépend soit de l'excès de contrainte de cisaillement (Hairsine et Rose, 1992; Foster et al., 1995; Wagenbrenner et al., 2010) avec l'érodibilité donnée par Kr [T L−1], soit de la puissance du courant (Wagenbrenner et al., 2010) avec l'érodibilité donnée par KΩ [M L−1]. Français L'érodabilité des rigoles dans les zones brûlées à haute intensité est environ trois ordres de grandeur plus grande que pour les sols non brûlés, et diminue avec le temps en réponse aux changements dans les sédiments disponibles sur des échelles de temps de quelques minutes (Pierson et al., 2008 ; Wagenbrenner et al., 2010). L'érosion des rigoles dans les terrains escarpés, où les contraintes de cisaillement et les capacités de transport augmentent rapidement avec la pente, peut différer de celle utilisée dans les modèles développés pour les sols agricoles (Foster et Meyer, 1972) où les pentes sont moindres. Ainsi, des recherches futures sur l'érosion dynamique des rigoles dans les zones brûlées sont nécessaires pour mieux comprendre comment : (1) l'érodabilité change avec le temps ; (2) des pentes plus raides peuvent être prises en compte ; (3) la modification de la disponibilité des sédiments modifie la forme des rigoles ou des canaux, et (4) la modification de la rugosité des rigoles ou des canaux affecte les processus d'érosion des rigoles.

6.1.4. Glissements de terrain et glissements de terrain

Les glissements de terrain et les ruptures de pente dépendent de la résistance au cisaillement du sol. La résistance au cisaillement est fonction de la pression interstitielle du sol, de l'angle de frottement interne et de la cohésion racinaire (Schmidt et al., 2001). Les sols secs ont généralement une pression interstitielle négative, ce qui tend à augmenter la résistance au cisaillement (Rahardjo et al., 2005) et à produire des pentes stables, tandis que l'infiltration des eaux de pluie ou la fonte des neiges peuvent produire des sols humides proches de la saturation avec une faible résistance au cisaillement qui est propice aux glissements de terrain ou aux ruptures de pente (Gabet et Mudd, 2006 ; Germer et Braun, 2011).

Les racines augmentent généralement la cohésion, la résistance au cisaillement et la stabilité des pentes. Cependant, les feux de forêt peuvent tuer des arbres et, plus tard, à mesure que leurs racines se décomposent, la stabilité des pentes diminue et les glissements de terrain et les ruptures de pente sont plus fréquents (Benda et Dunne, 1997 ; Jackson et Roering, 2009). Alors que les vieilles racines se décomposent, de nouvelles racines poussent de sorte que la force des racines atteint un minimum de 8 à 12 ans après la mort des arbres, ce qui conduit à une

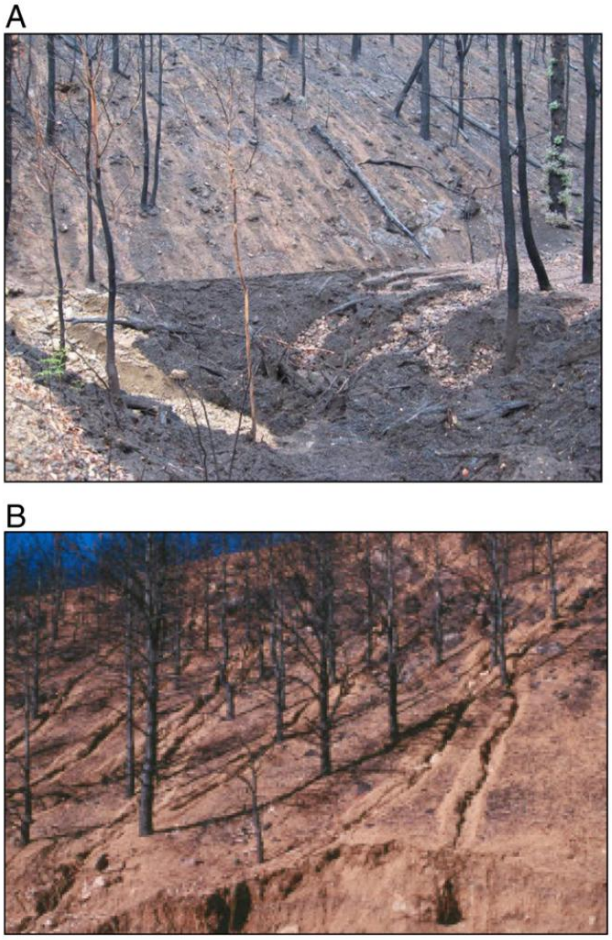

Fig. 12. (A) L'érosion en nappes avec un motif tressé domine sur une pente de colline brûlée par les feux de forêt du samedi noir de 2009 dans la région de Kinglake à Victoria, en Australie. Des cendres se sont accumulées dans le creux au milieu de la photographie prise en mars 2009, environ un mois après les feux de forêt. (B) Érosion en rigoles sur une pente de colline brûlée par l'incendie de forêt de Buffalo Creek de 1996 dans le Colorado Front Range au sud-ouest de Denver, Colorado, États-Unis.

augmentation associée aux glissements de terrain et aux ruptures de pente (Schmidt et al., 2001 ; Jackson et Roering, 2009).

6.1.5. Érosion par drainage, chenal et coulée de débris Les

drainages sont des dépressions de versants (Fig. 7C) où le ruissellement est concentré, mais où le débit est insuffisant pour créer un chenal aux berges distinctes. Un ruissellement accru provenant de zones brûlées peut cependant provoquer l'incision de ces éléments et la formation de chenaux (Collins et Ketcham, 2005 ; Moody et Kinner, 2006 ; Moody et al., 2008b). À cette échelle, la profondeur d'écoulement est souvent supérieure aux hauteurs de rugosité (rugosité relative faible), de sorte que les modèles traditionnels de transport de sédiments pour la charge de fond (Gomez, 1991) et la charge en suspension (Yang, 2006) peuvent être applicables si les concentrations de sédiments sont faibles. Cependant, il faut tenir compte du fait que ces chenaux sont plus abrupts que ceux pour lesquels des modèles de transport traditionnels ont été développés, et qu'il est nécessaire de modifier les équations de résistance au frottement (Armanini et de Silvio, 1991 ; Wohl, 2010 ; Lamb et al., 2011). Les coulées de débris représentent un cas particulier d'écoulement chargé de sédiments dans les chenaux. Elles sont classées comme des fluides non newtoniens avec une concentration de sédiments non consolidés de 50 à 77 % en volume, créant un fluide interstitiel d'eau et de sédiments fins ressemblant à du « béton humide » et capable de supporter du gravier et des rochers pendant l'écoulement (Pierson et Costa, 1987 ; Costa, 1988 ; Iverson, 1997). Elles fonctionnent cependant pendant des périodes relativement courtes (b104 s) (Iverson, 1997) et ont été signalées dans de nombreux domaines d'intervention post-incendie différents.

Machine Translated by Google

(Conedera et al., 2003; Van Dine et al., 2005; Cannon et al., 2010; Nyman et al., 2011; García-Ruiz et al., 2012; Sass et al., 2012b).

Français Un seuil important, bien que mal compris, est le mécanisme de déclenchement des coulées de débris dans différents domaines de réponse après un incendie de forêt. L'un des mécanismes a été décrit comme l'entraînement progressif du sol érodé des pentes et des canaux par le ruissellement (Wells, 1987 ; Meyer et Wells, 1997 ; Cannon et al., 2001a, b ; 2003 ; Cannon et Gartner, 2005 ; Santi et al., 2008) associé au rôle des cendres pour fournir suffisamment de matériaux à grains fins (Gabet et Sternberg, 2008) pour soutenir les sédiments. Le passage d'un sédiment soutenu par des forces de turbulence des fluides à un sédiment soutenu par des forces de turbulence des fluides et des solides (Iverson, 1997) et le processus d'entraînement des sédiments (McCoy et al., 2012) ne sont pas compris. Français Un deuxième mécanisme possible est la saturation du sol au-dessus de la « couche » hydrofuge induite par le feu, qui initie des « coulées de débris minces » (Gabet, 2003b). Un troisième mécanisme possible résulte de glissements de terrain peu profonds induits par l'infiltration dans des sols à faible conductivité hydraulique, ce qui augmente la pression interstitielle entraînant une liquéfaction et une mobilisation (Gabet, 2003b). Il s'agit d'un mécanisme observé dans des environnements non brûlés (Gabet et Mudd, 2006 ; Gabet et Sternberg, 2008) où le rapport entre les particules fines et les particules de la taille du sable semble être aussi important que la conductivité hydraulique, mais il ne peut pas expliquer l'augmentation de la taille d'une coulée de débris (Santi et al., 2008). Le premier mécanisme dépend de l'érodabilité du sol, le deuxième de l'intensité et de la variation spatiale des zones de SWR, et le dernier de la résistance au cisaillement et des propriétés hydrauliques des sols souterrains.

6.2. Disponibilité des sédiments

Les feux de forêt augmentent directement la disponibilité des sédiments de deux façons. Tout d'abord, la canopée, la litière et les couches d'humus sont brûlées, ce qui augmente l'apport de sédiments en exposant de grandes zones de sol nu sur les pentes des collines aux forces érosives une fois que la couche protectrice de cendres est retirée du système. Ensuite, l'impulsion de chaleur dans le sol modifie l'érodabilité en modifiant la stabilité des agrégats (Mataix-Solera et al., 2011), en réduisant la contrainte de cisaillement critique nécessaire pour initier le mouvement (Moody et al., 2005 ; Wagenbrenner et al., 2010), en augmentant le coefficient de taux de transport (Roering et Gerber, 2005) et en diminuant la cohésion des racines (Moody et Nyman, 2012). Cependant, l'épaisseur du sol érodable est inconnue et transitoire, car elle est épuisée par les forces érosives.
Cela limite éventuellement l'apport de sédiments dans les chenaux (Meyer et Wells, 1997; Desilets et al., 2007) comme source de sédiments pour les inondations et les coulées de débris. Une autre source potentielle de sédiments est constituée par les berges des cours d'eau dans la zone riveraine qui n'ont peut-être pas été touchées par les feux de forêt. Ces sources représentent une augmentation indirecte de la disponibilité des sédiments en conséquence de l'augmentation de la réponse du ruissellement après les incendies de forêt. Cependant, il n'existe actuellement aucune méthode fiable pour évaluer la distribution spatiale de ces sources de sédiments.

Français Certains chercheurs ont utilisé le temps écoulé depuis le dernier incendie (Rowe et al., 1954) comme indicateur pour estimer l'apport de sédiments, tandis que d'autres ont utilisé une méthode d'enquête plus directe (Staley et al., 2010 ; Schmidt et al., 2011). Cette méthode consiste à différencier les relevés LiDAR terrestres à haute résolution (échelle millimétrique à centimétrique) avant et après l'inondation, combinés à une cartographie détaillée du processus et à une caractérisation de la forme géomorphique pour identifier les emplacements des sources de sédiments (Fig. 13). La végétation peut piéger les sédiments (Lamb et al., 2011), de sorte que les cartes de végétation peuvent fournir des estimations de l'apport de sédiments pour le processus de ravel sec (Gabet, 2003a). La détermination de la disponibilité des sédiments pour l'érosion des chenaux dépendra de la compréhension des processus d'entraînement des sédiments pour l'écoulement dans les chenaux abrupts (Armanini et de Silvio, 1991 ; Takahashi et Sawada, 1994 ; Wohl, 2010 ; Lamb et al., 2008). Cependant, des recherches supplémentaires sont nécessaires sur d'autres processus de transport fluvial et de coulées de débris et sur l'exploration des méthodes de télédétection pour déterminer dans quelle mesure l'apport de sédiments dans un bassin pourrait dépendre des propriétés géomorphiques et géologiques du bassin et du chenal (par exemple, la courbure, la pente, la densité de drainage et la géologie du substratum rocheux).

La détermination de la disponibilité initiale des sédiments et des changements dans l'érodabilité et l'approvisionnement est l'un des problèmes les plus difficiles de la prévision de l'érosion après un incendie de forêt.

6.3. Mesures de l'érosion et du transport après un incendie de forêt

En réponse à la diversité des processus d'érosion et de transport post-incendie qui se produisent à différentes échelles, une série de méthodes de mesure ont été utilisées. Les résultats mesurés à une échelle donnée ne peuvent pas être agrandis ou réduits à moins que l'on sache que le processus dominant a des échelles temporelles et spatiales identiques ou similaires. Ces différentes échelles expliquent également en partie les nombreuses méthodes développées pour mesurer la réponse des sédiments après un incendie. En voici quelques exemples : (1) les changements du niveau du sol mesurés à l'aide de broches d'érosion ou d'un dispositif de microprofilage tel qu'un pont d'érosion ; (2) les coupes transversales de pentes ou de canaux étudiés ; (3) les échantillonneurs de sédiments en suspension ; (4) les parcelles de pentes délimitées et non délimitées ; (5) les quantités de sédiments emprisonnés derrière des barrières anti-érosion et des barrages de débris ; et (6) les sédiments accumulés dans de petits réservoirs. Chacune de ces méthodes a produit une unité de mesure différente (Shakesby et Doerr, 2006 ; Moody et Martin, 2009a). L'utilisation du rendement sédimentaire (masse/surface horizontale/an) est le fruit de recherches sédimentaires antérieures axées sur des questions à plus grande échelle et à long terme, comparant l'érosion à l'échelle continentale sur plusieurs décennies. L'utilisation du rendement a continué, probablement à des fins de comparaison, mais il n'est peut-être pas le plus représentatif des processus d'érosion à petite échelle dans les bassins brûlés, de leur caractère épisodique (changeant en quelques minutes ou heures), ou de la nature de l'érosion post-incendie elle-même. Ainsi, une mesure du rendement sédimentaire pourrait convenir aux processus d'érosion des pentes, mais d'autres moyens d'expression pourraient être plus adaptés aux processus d'érosion des chenaux (masse/surface transversale/unité de temps), aux impacts sur l'habitat des poissons (masse/largeur/temps) et à la dénudation (profondeur enlevée/surface unitaire/unité de temps).

Français La plupart des mesures de l'érosion sur le terrain posent problème : elles ont tendance à ne se poursuivre que sur de courtes périodes (généralement pas plus de 3 ans) et ne couvrent généralement qu'une partie de la période de rétablissement après un incendie de forêt. Ainsi, les perspectives à long terme de l'impact des incendies de forêt sont rares (Heede et al., 1988 ; Cerdà et Doerr, 2005 ; Cerdà et Lasanta, 2005), et il en faut davantage pour comprendre l'effet sur les écosystèmes sur des échelles de temps plus longues. D'autres méthodes peuvent fournir à la fois une perspective de l'ordre de plusieurs décennies et une vue à relativement grande échelle, notamment la mesure du 137Cs (Menéndez-Duarte et al., 2009), qui a été utilisée en conjonction avec d'autres radionucléides cosmogéniques (Blake et al., 2009 ; Smith et al., 2011b,c), et l'évaluation des volumes de sédiments dans les réservoirs drainant les zones brûlées. L'utilisation de traceurs de sédiments est un vaste domaine, et nous renvoyons le lecteur intéressé à la revue de Smith et al. (2012). Cependant, chaque méthode a ses propres problèmes. Certaines nécessitent souvent des conditions très exigeantes pour être utilisées avec succès, et l'érosion liée aux incendies peut être difficile à distinguer de celle produite entre les incendies de forêt. Étant donné que le nombre d'applications de radionucléides cosmogéniques liées aux incendies de forêt est relativement faible (Smith et al., 2012) à ce jour, il y a eu peu d'occasions de vérifier les taux d'érosion estimés avec ceux recueillis à l'aide de méthodes plus conventionnelles.

La prévision de l'érosion et du dépôt peut être affectée par la variabilité temporelle de la pluie (Benavides-Solario et MacDonald, 2005 ; Rulli et al., 2006 ; Mayor et al., 2007) de sorte qu'il est important de normaliser les valeurs d'érosion en fonction d'une mesure des précipitations (par exemple, le total des précipitations, l'intensité des précipitations ou une fonction de l'intensité des précipitations). La normalisation sur la base d'une tempête suppose que toutes les tempêtes ont la même durée. Elle tend également à biaiser les résultats en excluant les longs intervalles entre les tempêtes où il n'y a pratiquement pas d'érosion. Certaines valeurs publiées du rendement sédimentaire ont été normalisées par les précipitations cumulées totales (Johansen et al., 2001) et l'érosivité des précipitations (Spigel et Robichaud, 2007). Toutes ces différentes unités de mesure ont rendu difficile la comparaison des réponses sédimentaires après un feu de forêt (Shakesby et Doerr, 2006 ; Moody et Martin, 2009a). Un objectif important pour l'étude

Machine Translated by Google

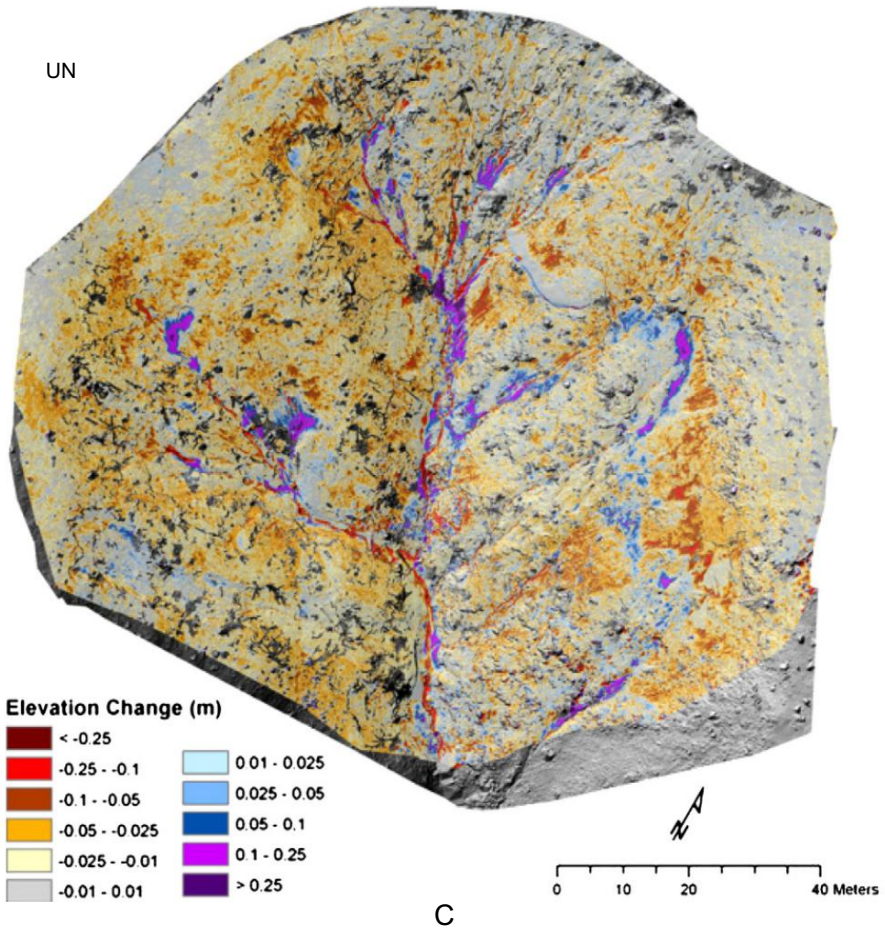

Fig. 13. A. Estimations des sédiments disponibles réalisées en différenciant deux relevés LiDAR montés sur trépied (septembre 2008 et décembre 2008) dans un petit bassin versant brûlé par le déluge de 2008 Incendie de Gap en Californie. Les zones sources de sédiments sont représentées en jaune-rouge-brun et les zones de dépôt en bleu-violet (Staley et al., 2010).

L'avenir consiste à déterminer quelles méthodes de mesure standard sont appropriées pour la recherche sur les sédiments après un incendie de forêt et comment elles peuvent être utilisées. mis en œuvre pour garantir que des mesures vitales, mais pas nécessairement difficiles, des mesures sont effectuées (à condition qu'un chercheur soit conscient de la besoin) à l'avenir de fournir des données comparables. Un moyen d'accélérer le processus de diffusion pourrait consister à créer un site Web similaire à disponible pour les données sur le charbon de bois des sédiments (International Multiproxy Données sur les sédiments de charbon de bois de la base de données Paleofire ; http://www.ncdc.noaa. (gov/paleo/impd/impd_char_submit.html).

6.4. Causes des différences de processus entre les domaines post-incendie

L'érosion et le transport après un incendie de forêt sont particulièrement complexes processus non linéaires car ils dépendent d'un modèle de type « toile » d'autres processus non linéaires tels que les précipitations à méso-échelle, l'infiltration dans les sols hydrofuges, le ruissellement dépendant du tartre et les sédiments disponibilité. Il semble difficile de démêler ce réseau pour identifier pourquoi un processus domine dans un domaine post-incendie et un autre domine ailleurs. Peut-être faudrait-il supposer que tous les processus d'érosion et de transport de sédiments sont possibles, mais un ou deux sont sélectionnés pour dominer à un moment donné en réponse aux caractéristiques particulières du feu, des précipitations et de l'hydrogéomorphisme régimes. Par exemple, dans certains domaines, en réponse à une tempête spécifique conditions, l'érosion du chenal contribue plus à la sédimentation que la pente de la colline érosion (Moody et Martin, 2001b, 2009a ; Santi et al., 2008), alors que dans d'autres domaines (mais aussi parfois dans le même domaine) en réponse à des précipitations moins intenses, la plupart des matériaux proviennent de pentes des collines (Staley et al., 2010). Dans un autre domaine encore, le ravel sec est produit (sans aucune pluie) en abondance et les contributions de la pente de la colline et les canaux sont considérés comme étant à peu près égaux (Wohlgemuth par. commun. 1999; (Wohlgemuth et Hubbert, 2008).

L'érosion de surface par infiltration et écoulement excessif a été documentée dans de nombreux domaines d'intervention après incendie de forêt (Martin et Moody, 2001; Kinner et Moody, 2010; Robichaud, 2000; Pierson et al., 2001, 2007; Nyman et al., 2011; Ebel et Moody, 2012; Lane et al., 2012), mais ne semble pas être important dans d'autres (Wondzell et King, 2003). La proportion d'écoulements de surface par infiltration et par saturation varie sur de longues périodes et sur des périodes plus courtes au sein d'un même individu. tempêtes (Schmidt et al., 2011 ; Ebel et Moody, 2012), et il est probable que la proportion de ces mécanismes varie selon les domaines de réponse post-incendie. De même, les coulées de débris ont une dynamique différente au niveau même site pour différentes tempêtes de pluie (Kean et al., 2011), et les processus d'initiation des coulées de débris varient selon qu'ils sont dominés par le ruissellement ou non. et dominé par l'infiltration (Cannon et al., 2001a, b; Jackson et (Remuant, 2009).

Une première étape proposée pour comprendre les raisons de la prédominance de processus spécifiques d'érosion et de transport de sédiments dans certaines régions les domaines de réponse post-incendie de forêt consisteraient à identifier et à compiler dans une base de données les mesures quantitatives des régimes d'incendie, de précipitations et hydro-géomorphiques (voir section 2) associés à chaque processus, son ampleur et tous les seuils associés. Cela fournir le cadre initial. Une deuxième étape pourrait consister à inclure

Machine Translated by Google

mesures des changements dans le sol et les caractéristiques hydrauliques du sol
propriétés, ce qui permettrait une sous-classification plus poussée des processus dans le
cadre organisationnel des domaines post-incendies de forêt. Ces ensembles de données
spécifiques au domaine pourraient ensuite être synthétisés
et les processus, modèles et généralités communs identifiés.

Mesures des propriétés du sol et mesures réelles de la
ampleur de l'érosion et du transport de sédiments après les feux de forêt
les réponses devraient être apportées en utilisant des procédures standard afin
pour produire des données comparables. Un tel modus operandi serait probablement
La meilleure façon d'y parvenir est de collaborer et de se consulter entre experts. Une réunion
internationale ou des sessions spéciales lors de réunions de scientifiques intéressés
constitueraient le forum pour le débat nécessaire.
conduisant au choix de méthodes de mesures standard afin
pour améliorer la comparabilité des résultats du monde entier. De plus, plusieurs sites
pourraient être identifiés et les mesures pourraient être poursuivies pendant
plusieurs années après un incendie majeur (dans le cadre d'un programme à long terme) pour
déterminer les impacts des incendies de forêt sur l'environnement. Cela fournirait
données basées sur les processus (collectées à l'aide de méthodes standard) pour améliorer
modèles d'érosion et de transport à long terme après incendie de forêt utilisés par les terres
et les gestionnaires d'urgence.

6.5. Orientations futures de la recherche

Plusieurs processus post-incendie peuvent éroder et transporter le sol et
sédiments, qui dépendent de la disponibilité des sédiments. Chacun des multiples processus
résumés dans la section 6.1 définit une érodibilité différente
« constante » liée aux propriétés du sol. Cependant, l'érodabilité n'est pas une véritable
constante mais plutôt dépendante de facteurs ayant des caractéristiques temporelles différentes
des échelles telles que la teneur en eau du sol, le SWR, la matière organique et les sédiments
l'approvisionnement, mais aussi sur la répartition spatiale des sols touchés par le feu
propriétés. Les principaux sujets de recherche sont les suivants :

(1) Quelles sont les relations entre les mesures quantitatives de brûlure
paramètres de gravité et d'érodabilité en fonction de la profondeur du sol,
types de sols et propriétés des racines ?
(2) Quels sont les processus d'entraînement et de transport des sédiments pour
coule dans des canaux abrupts et accidentés ?
(3) Quelles méthodes de mesure standard peuvent être utilisées pour évaluer la
apport de sédiments sur les pentes des collines et dans les canaux ?

7. Résumé

Un vaste corpus de données empiriques et de connaissances physiques associées
Il existe désormais des données sur les processus complexes de ruissellement et d'érosion
post-incendie dans de nombreux domaines différents post-incendie dans l'ensemble du pays.
monde. Un thème commun à chacun des quatre processus majeurs
(précipitations, infiltration, ruissellement et érosion des sols et des sédiments et
transport) a été discutée la nécessité de comprendre leur temporel
et les distributions spatiales (Fig. 14). Il est évident que les réponses post-incendie sont le
résultat de la superposition de la distribution spatiale
des précipitations sur la distribution spatiale des propriétés du sol affectées par le feu et
compliquée par des changements dans le temps sur différentes échelles de temps.
Il a été démontré que les propriétés du sol constituent un lien essentiel entre tous les principaux
processus (Fig. 14).

Ainsi, la priorité absolue des futures recherches sur le ruissellement et l'érosion après les
incendies de forêt est de comprendre les relations entre les propriétés du sol

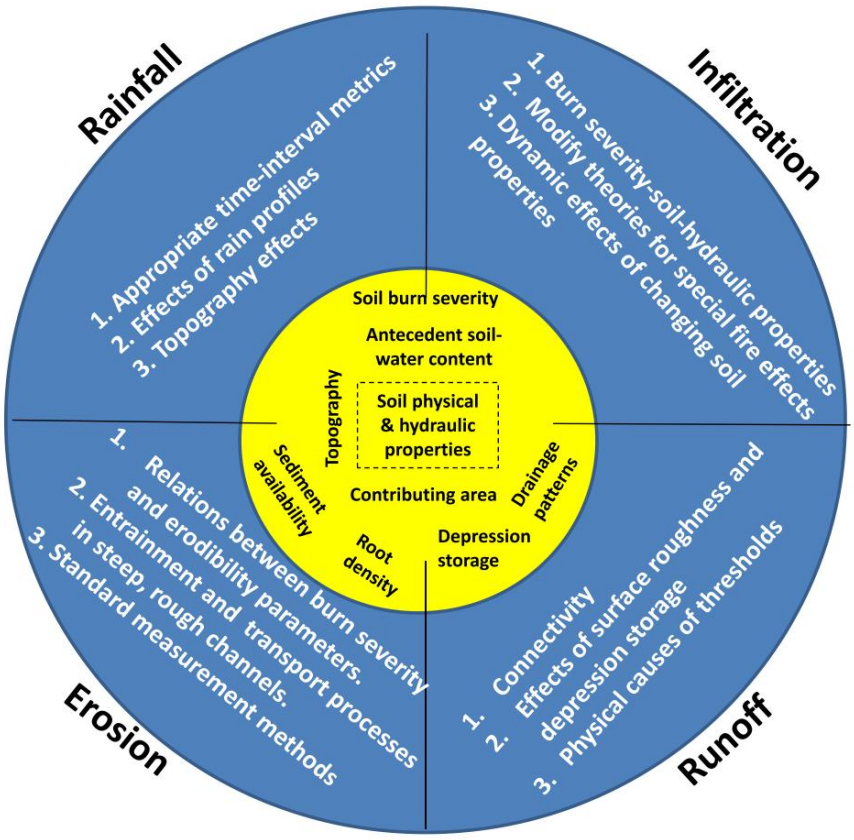

Fig. 14. Représentation schématique des problématiques de recherche pour les quatre principaux processus de réponse au ruissellement et à l'érosion après un incendie de forêt évoqués dans le texte. Les fines lignes noires divisent les diagramme en quatre processus (précipitations, infiltration, ruissellement et érosion), où le cercle jaune central représente les facteurs associés à chaque processus. Lorsqu'un facteur couvre un ou plusieurs processus (par exemple, « gravité des brûlures du sol »), un lien entre les processus respectifs est alors indiqué. Les principaux problèmes de recherche pour chaque processus sont présentés dans le cercle bleu extérieur. L'objectif ultime est d'organiser et de synthétiser la vaste quantité de données empiriques provenant de différents domaines post-incendies de forêt afin de mieux comprendre chaque processus, les raisons des différences de réponse et de prédire spécifiquement, aussi près que possible en temps réel, la réponse du ruissellement, de l'érosion et du transport de sédiments après un incendie de forêt si un incendie de forêt devait se produire. brûler un bassin non brûlé dans l'un des domaines après incendie de forêt. (Pour l'interprétation des références à la couleur dans la légende de cette figure, le lecteur est renvoyé à la version Web de cet article.)

Machine Translated by Google

et les paramètres de gravité des brûlures (qui incluent les paramètres de répulsion de l'eau du sol). Les propriétés du sol comprennent (1) la teneur en eau du sol qui peut affecter les précipitations à méso-échelle, (2) les propriétés hydrauliques du sol (caractéristiques de rétention d'eau du sol, sorptivité et conductivité hydraulique saturée et insaturée) qui contrôlent l'infiltration, la connectivité et la zone contributive, (3) les changements physiques des propriétés du sol qui provoquent l'étanchéité, le stockage en dépression et les changements de rugosité de la surface, et (4) les multiples paramètres d'érodabilité du sol. Toutes ces propriétés du sol peuvent changer brusquement pendant un feu de forêt, puis changer plus lentement après celui-ci.

La deuxième priorité est de caractériser de manière appropriée les précipitations à méso-échelle, car elles constituent le principal facteur de réponse après un incendie de forêt. Il faut comprendre les bases physiques permettant de déterminer les paramètres d'intervalle de temps qui prédisent le mieux le ruissellement et l'érosion et la manière dont ceux-ci dépendent de l'échelle si l'on veut appliquer ce qui est appris dans un domaine de réponse après un incendie de forêt à d'autres domaines moins étudiés. De plus, des paramètres de séquence appropriés doivent être sélectionnés pour représenter les effets de la distribution temporelle des précipitations sur le ruissellement et l'érosion après un incendie de forêt (Fig. 14).

La troisième priorité est de développer des méthodes pour déterminer l'apport de sédiments et de modifier les algorithmes de transport de sédiments existants afin qu'ils puissent être utilisés pour prédire l'entraînement du sol et des sédiments et leur transport à travers des chenaux abrupts et accidentés. Pour aider à surmonter le manque de données suffisantes sur le ruissellement, l'érosion et le transport dans les bassins brûlés, l'importance des caractéristiques morphologiques des bassins brûlés doit être étudiée afin que leurs effets puissent être intégrés à des échelles spatiales et temporelles appropriées.

Nous avons proposé un cadre dans lequel les réponses post-incendie peuvent être organisées en domaines de réponse post-incendie avec trois mesures quantifiables décrivant la gamme de caractéristiques des régimes d'incendie, de précipitations et hydrogéomorphiques. En organisant les réponses post-incendie au ruissellement et à l'érosion en domaines, cette procédure aidera à synthétiser les données en identifiant les modèles communs et les généralités dans le but de comprendre les raisons des différentes réponses au sein et entre les domaines.

Remerciements

Cette analyse est le fruit de nombreuses conversations avec de nombreux spécialistes intéressés par la science et la gestion des terres. Ces conversations ont duré des décennies et couvrent tous les continents. Parmi les scientifiques impliqués, on trouve : Susana Bautista, Chris Chafer, Artemi Cerdà, Juan de la Fuente, Stefan Doerr, Brian Ebel, António Ferreira, Geoff Humphreys, Jason Kean, Patrick Lane, Isaac Larson, Lee MacDonald, Jorge Mataix-Solera, João Nunes, Petter Nyman, David Scott, Gary Sheridan, Hugh Smith, Dennis Staley, Cathelijne Stoof, Xavi Úbeda, Joe Wagenbrenner, Pete Wohlgemuth et bien d'autres. Enfin, nous adressons des remerciements particuliers à deux examinateurs anonymes de la revue et à Merche Bodí, Brian Ebel, Petter Nyman, Cathelijne Stoof et Joe Wagenbrenner, dont les commentaires nous ont encouragés à « creuser » plus profondément et à produire une revue plus complète et plus ciblée des problèmes de recherche auxquels est confrontée la communauté des feux de forêt.

Références

Agee, JK, 1993. Écologie des incendies dans les forêts du nord-ouest du Pacifique. Island Press, Washington, DC(493 pp.).

Anderson, HW, Coleman, GB, Zinke, PJ, 1959. Glissements estivaux et érosion hivernale ; érosion sèche-humide dans les montagnes du sud de la Californie. Département de l'agriculture des États-Unis, Service des forêts, Station expérimentale des forêts et des pâturages du sud-ouest du Pacifique, document de recherche, PSW 36. (12 pp.).

Antoine, M., Javaux, M., Bielders, CL, 2011. Intégration des propriétés de connectivité sous-maille de la micro-topographie dans les modèles d'écoulement distribué, à l'échelle inter-ruisseaux. Journal of Hydrology 403, 213–223.

Archibald, S., Bond, WJ, Stock, WD, Fairbanks, DHK, 2005. Façonner le paysage : interactions feu-brouteurs dans une savane africaine. Applications écologiques 15, 96–109.

Armanini, A., de Silvio, G., 1991. Hydraulique fluviatile des régions de montagne. Lecture Notes in Earth Sciences, vol. 37. Springer-Verlag, Heidelberg, Allemagne (468 pp.).

ASRIS, 2012. Système australien d'information sur les ressources en sols. http://www.asris.csiro.au/ (consulté en octobre 2012).

Assouline, S., 2004. Imperméabilisation des sols due aux précipitations : revue critique des observations, des modèles conceptuels et des solutions. Vadose Zone Journal 3, 570–591.

Bachelet, D., Lenihan, JM, Nielson, RP, 2007. Incendies de forêt et changement climatique mondial. L'importance du changement climatique pour les scénarios futurs d'incendies de forêt dans l'ouest des États-Unis, extrait de Ebi, Kristie, et al., Impacts régionaux du changement climatique, quatre études de cas aux États-Unis, Pew Center on Global Climate Change (20 pp.
Disponible sur http://www.pewclimate.org/docUploads/Regional-Impacts-West.pdf, (dernière consultation le 30 janvier 2012).

Bachmann, J., Deurer, M., Arye, G., 2007. Modélisation du mouvement de l'eau dans un sol hétérogène hydrofuge : 1. Développement d'un modèle de rétention d'eau dépendant de l'angle de contact. Vadose Zone Journal 6, 436–445.

Baker, WL, 2003. Incendie et climat dans les paysages forestiers des montagnes Rocheuses américaines. Dans : Veblen, TT, Baker, WL, Montenegro, G., Swetnam, TW (éd.), Incendies et changements climatiques dans les écosystèmes tempérés des Amériques occidentales. Springer, New York, pp. 120–157 (chapitre 5).

Baker, WL, Ehle, D., 2001. Incertitude dans l'histoire des incendies de surface : le cas de la forêt de pins ponderosa dans l'ouest des États-Unis. Revue canadienne de recherche forestière 31, 1205–1226.

Banta, RM, Schaaf, CB, 1987. Zones de genèse des orages dans les montagnes Rocheuses du Colorado déterminées par traçage d'images satellites géosynchrones.
Revue mensuelle de météo 115, 463–476.

Barfield, BJ, Warner, RC, Haan, CT, 1981. Hydrologie et sédimentologie appliquées aux zones perturbées. Oklahoma Technical Press, Stillwater, Oklahoma (145 pp.).

Batchelor, GK, 1982. La théorie de la turbulence homogène. Université de Cambridge
Presses, New York (212 pp.).

Beck, PSA, Goetz, SJ, Mack, MC, Alexander, HD, Jin, Y., Randerson, JT, Loranty, MM, 2011. Les impacts et les implications d'un régime d'incendies de plus en plus intense sur la composition et l'albédo de la forêt boréale de l'Alaska. Global Change Biology 17. http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02412.x .

Benavides-Solario, J., MacDonald, LH, 2005. Mesure et prévision de l'érosion post-incendie à l'échelle des pentes, Colorado Front Range. International Journal of Wildland Fire 14, 1–18.

Benda, L., Dunne, T., 1997. Forçage stochastique de l'apport de sédiments aux réseaux de canaux par glissement de terrain et coulée de débris. Water Resources Research 33 (12), 2849–2863.

Bento-Gonçalves, A., Vieira, A., Úbeda, X., Martin, D., 2012. Feu et sols : concepts clés et avancées récentes. Géoderme. http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.01.004.

Berg, NH, Azuma, DL, 2010. Sol nu et formation de rigoles après incendies de forêt, traitements de réduction des combustibles et plantations de pins dans le sud de la Sierra Nevada, Californie, États-Unis. International Journal of Wildland Fire 19, 478–489.

Berli, M., Chen, L., Young, M., 2008. Effets des feux de forêt sur les processus hydrologiques des bassins versants : une introduction pour les ingénieurs hydrauliques, les gestionnaires et les planificateurs des bassins versants. Desert Research Institute (publication n° 41243, 42 pp.).

Bernardara, P., DeMichele, C., Rosso, R., Passoni, G., 2003. Space–Time Dynamics of Rainfall: Spectral Analysis, Actes de la 4e conférence EGS Plinius, Majorque, Espagne (4 pp.).

Berner, LT, Beck, PA, Loranty, MM, Alexander, HD, Mack, MC, Goetz, SJ, 2012.
Répartition de la biomasse du mélèze de Cajander (Larix cajanderi), régime des incendies et rétablissement après incendie dans le nord-est de la Sibérie. Biogeosciences Discussions 9 (6), 7555–7600.

Betson, RP, 1964. Qu'est-ce que le ruissellement des bassins versants ? Journal of Geophysical Research 69, 1541–1552.

Beven, KJ, 1996. Équifinalité et incertitude dans la modélisation géomorphologique. Dans : Rhoads, BL, Thorn, CE (éd.), La nature scientifique de la géomorphologie : actes du 27e symposium de Binghamton en géomorphologie, 27-29 septembre 1996. John Wiley & Sons Ltd., Chichester, Angleterre, pp. 289-313.

Beven, KJ, 2000. Modélisation des précipitations et du ruissellement : introduction. John Wiley and Sons, Ltd., Chichester, Angleterre (353 pp.).

Beven, KJ, Kirkby, MJ, 1979. Un modèle de zone contributive variable basé sur la physique
Hydrologie des bassins. Bulletin des sciences hydrologiques 24, 43–69.

Bigio, E., Swetnam, TW, Baisan, CH, 2010. Comparaison et intégration des cernes des arbres et des enregistrements alluviaux de l'histoire des incendies sur le site de l'incendie de Missionary Ridge, Durango, Colorado, États-Unis. The Holocene 20 (7), 1047–1061.

Blake, WH, Wallbrink, PJ, Wilkinson, SN, Humphreys, GS, Doerr, SH, Shakesby, RA, Tomkins, KM, 2009. Dérivation des bilans sédimentaires des pentes des forêts touchées par les feux de forêt à l'aide de traceurs de radionucléides retombés. Géomorphologie 104, 105–116.

Bodi, MB, Mataix-Solera, J., Doerr, SH, Cerdà, A., 2011. La mouillabilité des cendres de végétation brûlée et sa relation avec le type d'espèces végétales méditerranéennes, la gravité du brûlage et la teneur totale en carbone organique. Geoderma 160, 599–607.

Bowman, DS, Balch, J., Artaxo, P., Bond, WJ, Cochrane, MA, D'Antonio, CM, DeFries, R., Johnston, FH, Keeley, JE, Krawchuk, MA, Kull, CA, Mack, M., Moritz, MA, Pyne, S., Roos, CI, Scott, AC, Sodhi, NS, Swetnam, TW, 2011. La dimension humaine des régimes de feu sur Terre. Journal of Biogeography 38 (12), 2223–2236.

Brown, JAH, 1972. Effets hydrologiques d'un feu de brousse dans un bassin versant du sud-est de la Nouvelle-Galles du Sud. Journal of Hydrology 15, 77–96.

Brown, JK, 2000. Introduction et régimes d'incendie. Dans : Brown, JK, Smith, JK (éd.), Incendies de forêt dans les écosystèmes : effets des incendies sur la flore. Rapport technique général RMRS-GTR-42- Volume 2. Département de l'agriculture des États-Unis, Service des forêts, Ogden, Utah, pp. 1–8.

Brown, JR, Jakob, C., Haynes, JM, 2010. Une évaluation de la fréquence et de l'intensité des précipitations sur la région australienne dans un modèle climatique mondial. Journal of Climate 23, 6504–6525.

Bryan, RB, 2000. Érodibilité des sols et processus d'érosion hydrique sur les pentes des collines. Géomorphologie 32, 385–415.

Burns, JL, 1953. Effets topographiques à petite échelle sur la distribution des précipitations dans la forêt expérimentale de San Dimas. Eos, Transactions American Geophysical Union 34 (1), 761–768.

Machine Translated by Google

Byram, GM, Martin, RE, 1970. La modélisation des tourbillons de feu. Forest Science 16, 386–399.

Cammeraat, ELH, 2004. Seuils dépendants de l'échelle dans la réponse hydrologique et à l'érosion d'un bassin versant semi-aride du sud-est de l'Espagne. Agriculture, écosystèmes et environnement 104, 317–332.

Campbell, GS, Jungbauer Jr., JD, Bristow, KL, Hungerford, RD, 1995. Température et teneur en eau du sol sous un feu de surface. Soil Science 159 (6), 363–374.

Candela, A., Aronica, G., Santoro, M., 2005. Effets des incendies de forêt sur les courbes de fréquence des crues dans un bassin versant méditerranéen. Hydrological Sciences 50, 193–206.

Cannon, SH, Gartner, JE, 2005. Les coulées de débris liées aux feux de forêt du point de vue des risques. Dans : Hungr, O., Jakob, M. (éd.), Risques liés aux coulées de débris et phénomènes connexes. Springer-Praxis Books in Geophysical Sciences, Chichester, Royaume-Uni, pp. 321–344.

Cannon, SH, Bigio, ER, Mine, E., 2001a. Un processus d'initiation de coulées de débris liées à un incendie, incendie de Cerro Grande, Nouveau-Mexique. Hydrological Processes 15, 3011–3023.

Cannon, SH, Kirkham, RM, Parise, M., 2001b. Processus d'initiation de coulées de débris liés aux feux de forêt, Storm King Mountain, Colorado. Geomorphology 39, 171–188.

Cannon, SH, Gartner, JE, Parrett, C., Parise, M., 2003. Génération de coulées de débris liées aux feux de forêt par des processus épisodiques de gonflement progressif des sédiments, ouest des États-Unis
Dans : Rickenmann, D., Chen, CL (éd.), Debris-Flow Hazards Mitigation—Mechanics, Prediction, and Assessment, actes de la troisième conférence internationale sur l'atténuation des risques liés aux coulées de débris, Davos, Suisse, 10-12 septembre 2003.
Balkema, Rotterdam, pp. 71–82.

Cannon, SH, Gartner, JE, Wilson, RC, Laber, JL, 2008. Conditions de précipitations lors des tempêtes pour les inondations et les coulées de débris dans les zones récemment brûlées dans le sud-ouest du Colorado et le sud de la Californie. Geomorphology 96, 250–269.

Cannon, SH, Gartner, JE, Rupert, MG, Michael, JA, Rea, AH, Parrett, C., 2010.
Prévision de la probabilité et du volume des coulées de débris après incendies de forêt dans l'ouest intermontagneux des États-Unis. Geological Society of America Bulletin 122, 127–144.

Cannon, SH, Boldt, EM, Kean, JW, Laber, J., Staley, DM, 2011. Seuils d'intensité et de durée des précipitations pour la planification des interventions d'urgence en cas de coulées de débris après un incendie. Natural Hazards 59, 209–236.

Cawson, J., Sheridan, G., Lane, P., Smith, H., 2010. Caractérisation des zones de gravité des incendies pour comprendre comment la répartition des brûlures affecte la connectivité du ruissellement et l'érosion. Résumés de recherche géophysique 12, EGU2010-3009.

Cerdà, A., 1996. Variabilité saisonnière des taux d'infiltration dans des conditions de pente contrastées tions dans le sud-est de l'Espagne. Geoderma 69, 217–232.

Cerdà, A., 1998a. Modifications du ruissellement et de l'infiltration après un incendie de pâturage dans un maquis méditerranéen. Hydrological Processes 12, 1031–1042.

Cerda, A., 1998b. Dynamique post-incendie des processus érosifs dans les conditions climatiques méditerranéennes. Journal de géomorphologie nouvelle série 42, 373–398.

Cerdà, A., Doerr, SH, 2005. Influence de la régénération de la végétation sur l'hydrologie et l'érodabilité du sol après un incendie : une étude sur 11 ans. Revue internationale des incendies de forêt 14, 423–437.

Cerdà, A., Lasanta, A., 2005. Réponses érosives à long terme après incendie dans les Pyrénées centrales espagnoles : 1. Apport en eau et en sédiments. Catena 60, 59–80.

Cerdà, A., Robichaud, P., 2009. Effets du feu sur l'infiltration du sol. Dans : Cerdà, A., Robichaud, P. (éd.), Effets du feu sur les sols et stratégies de restauration. NH Science Publishers, Enfield, NH, pp. 81–104.

Cerrelli, GA, 2005. FIRE HYDRO, une méthode simplifiée de prévision des débits de pointe pour aider à la conception de mesures de protection contre les inondations en cas d'incendies de forêt dans l'Ouest. Dans : Moglen, GE (éd.), Actes : Conférence 2005 sur la gestion des bassins versants — Gestion des bassins versants pour les impacts humains et naturels : défis techniques, écologiques et économiques : 19-22 juillet 2005. American Society of Civil Engineers, Williamsburg, VA, pp. 935-941.

Certini, G., 2005. Effets du feu sur les propriétés des sols forestiers : une revue. Oecologia 143, 1–10.

Chafer, CJ, 2008. Comparaison des mesures de la gravité des incendies : un exemple australien et ses implications pour la prévision des principales zones d'érosion des sols. Catena 74, 235–245.

Chen, F., Warner, TT, Manning, K., 2001. Sensibilité de la convection humide orographique à la variabilité du paysage : une étude du cas de crue éclair de Buffalo Creek, Colorado, en 1996. Journal of the Atmospheric Sciences 58, 3204–3223.

Coelho, COA, Ferreira, AJD, Boulet, AK, Keizer, JJ, 2004. Processus de génération de ruissellement, rendements d'érosion et perte de nutriments sous les feux de différentes intensités — leçons tirées de l'analyse à différentes échelles. Revue trimestrielle de géologie et d'hydrogéologie de l'ingénierie 37, 233–240.

Collins, LM, Ketcham, B., 2005. Réponse géomorphique fluviatile d'un cours d'eau côtier du nord de la Californie aux feux de forêt. Département de l'intérieur des États-Unis, National Park Service Vision Fire Lessons Learned from the October 1995 Fire. Point Reyes National Seashore, pp. 59–79.

Conedera, M., Peter, L., Marxer, P., Forster, F., Rickenmann, D., Re, L., 2003. Conséquences des incendies de forêt sur la réponse hydrogéologique des bassins versants de montagne : une étude de cas de la Riale Buffaga, Tessin, Suisse. Earth Surface Processes and Landforms 28, 117–129.

Costa, JE, 1987. Comparaison des plus grandes inondations dues aux précipitations et au ruissellement aux États-Unis avec celles de la République populaire de Chine et du monde. Journal of Hydrology 96, 101–115.

Costa, JE, 1988. Différenciation rhéologique, géomorphique et sédimentologique des crues, des écoulements hyperconcentrés et des coulées de débris. Dans : Baker, VR, Kochel, RC, Patten, PC (éd.), Géomorphologie des inondations. Wiley-Interscience, New York, pp. 113–122.

Cowpertwait, PSP, Lockie, T., Davis, MD, 2004. Un modèle de désagrégation spatio-temporelle stochastique pour les précipitations. Lettres de recherche en sciences de l'information et mathématiques 6, 109–122.

Daly, C., Neilson, RP, Phillips, DL, 1994. Un modèle statistique-topographique pour la cartographie des précipitations climatologiques sur un terrain montagneux. Journal of Applied Meteo-rology 33, 140–158.

Davenport, DW, Breshears, DD, Wilcox, BP, Allen, CD, 1998. Point de vue : durabilité des écosystèmes pignons-genévriers — une perspective unificatrice des seuils d'érosion des sols.
Journal de gestion des pâturages 51 (2), 231–240.

DeBano, LF, 1981. Sols hydrofuges : un état des lieux. Département de l'agriculture des États-Unis, Rapport technique général du Service des forêts PSW-46. (21 pp.).

DeBano, LF, 2000. Le rôle du feu et du réchauffement du sol sur la répulsion de l'eau dans les environnements sauvages : une revue. Journal of Hydrology 231–232, 195–206.

DeBano, LF, Savage, SM, Hamilton, DA, 1976. Le transfert de chaleur et de substances hydrophobes pendant la combustion. Soil Science Society of America Journal 40 (5), 779–782.

DeBano, LF, Neary, DG, Ffolliott, PF, 1998. Effets du feu sur les écosystèmes. John Wiley & Fils, New York 159–196.

Decagon, 2006. Manuel d'utilisation des mini-infiltromètres à disque. Decagon Devices, Pullman, WA (18 p.).

Dekker, LW, Ritsema, CJ, 2000. Modèles de mouillage et variabilité de l'humidité dans l'eau sols néerlandais répulsifs. Journal of Hydrology 231–232, 148–164.

Desilets, SLE, Nigssen, B., Ekwurzel, B., Ferré, TPA, 2007. Changements dans les courbes de classement des sédiments en suspension après un incendie de forêt : Sabino Canyon, Arizona. Hydrological Processes 21, 1413–1423.

Díaz-Delgado, R., Lloret, F., Pons, X., 2004. Analyse statistique des modèles de fréquence des incendies en Catalogne (nord-est de l'Espagne), 1975-1998, à partir des cartes de cicatrices d'incendies issues des données Landsat MSS. International Journal of Wildland Fire 13, 89-99.

Dick, GS, Anderson, RS, Sampson, DE, 1997. Contrôles de l'ampleur des crues soudaines et de la forme de l'hydrogramme, badlands d'Upper Blue Hills, Utah. Geology 25 (1), 45–48.

Dietrich, WE, Wilson, CJ, Montgomery, DR, McKean, J., Bauer, R., 1992. Seuils d'érosion et morphologie de la surface terrestre. Geology 20, 675–679.

Doehring, DO, 1968. L'effet du feu sur les processus géomorphiques dans la région de San Gabriel Montagnes, Californie. Contributions à la géologie 7, 43–65.

Doerr, SH, Moody, JA, 2004. Effets hydrologiques de la répulsion de l'eau du sol : sur les incertitudes spatiales et temporelles. Hydrological Processes 18, 829–832.

Doerr, SH, Shakesby, RA, Walsh, RPD, 2000. Hydrophobie du sol : ses causes, ses caractéristiques et son importance hydrogéomorphologique. Earth-Science Reviews 51, 33–65.

Doerr, SH, Shakesby, RA, MacDonald, LH, 2009. Hydrofuge du sol : un facteur clé de l'érosion post-incendie. Dans : Cerdà, A., Robichaud, PR (éd.), Effets du feu sur les sols et stratégies de restauration. Science Publishers, New Hampshire, Enfield, NH, pp. 197–223.

D'Odorico, PR, Rigon, R., 2003. Contributions des pentes et des canaux à l'hydrologie réponse. Water Resources Research 39 (5), 1–9.

Dunkerley, DL, 2010. Comment les taux de pluie des intervalles de sous-événement tels que les taux maximaux de 5 et 15 minutes (I5 ou I30) sont-ils liés aux propriétés de l'événement pluviométrique englobant. Hydrological Processes 24, 2425–2439.

Dunkerley, DL, 2011. Effets des fluctuations d'intensité des précipitations sur l'infiltration et le ruissellement : simulation des précipitations sur les sols des zones arides, Fowlers Gap, Australie. Hydrological Processes 26 (15), 2211–2224.

Dunkerley, D., Martin, N., Berg, S., Ferguson, R., 2009. Incendie, ruissellement des bassins versants et processus d'érosion et programmes de réhabilitation post-incendie : expérience australienne récente.
Dans : Cerdà, A., Robichaud, PR (éd.), Effets du feu sur les sols et stratégies de restauration.
Éditeurs scientifiques, Enfield, NH, pp. 467–509.

Dunne, T., 1978. Études sur le terrain des processus d'écoulement sur les pentes. Dans : Kirkby, MJ (éd.), Hillslope Hydrologie. John Wiley & Sons, New York, pp. 227–293.

Ebel, BA, Moody, JA, 2012. Repenser l'infiltration dans les sols touchés par les feux de forêt. Hydrologique Processus. http://dx.doi.org/10.1012/hyp.9696.

Ebel, BA, Moody, JA, Martin, DA, 2012. Conditions hydrologiques contrôlant la production de ruissellement immédiatement après un incendie de forêt. Water Resources Research 48. http://dx.doi.org/10.1029/2011WR011470 W03529.

Eagleson, FS, Shack, WJ, 1966. Quelques critères pour la mesure des précipitations et du débit désactivé. Recherche sur les ressources en eau 2 (3), 427–436.

Elliot, WJ, Hall, DE, 2010. Modèle WEPP perturbé 2.0. Ver. 2011.11.22. Département américain de l'agriculture, Service des forêts, Station de recherche des Rocheuses, Moscou, Idaho (en ligne sur http://forest.moscowfsl.wsu.edu/fswepp).

Elliot, WJ, Liebenow, AM, Laflen, JM, Kohl, KD, 1989. Un recueil de données sur l'érodabilité des sols, formulaire WEPP Cropland Soil Field Erodibility Experiments 1987 & 88. NSERL Report No. 3. Ohio State University & USDA Agricultural Research Service (Partie A, 29 pp. ; Partie B, 291 pp.).

Elliot, WJ, Scheele, DL, Hall, DE, 1999. Rock:Clime-Rocky Mountain Research Station Climate Generator. Moscou, Idaho. Département de l'agriculture des États-Unis, Service des forêts, Station de recherche des montagnes Rocheuses, Laboratoire des sciences forestières de Moscou (en ligne sur http://forest.moscowfsl.wsu.edu/fswepp>).

Elliot, WJ, Hall, DE, Robichaud, PR, 2010. Calculateur de débit de pointe FS. Version 2010.10.28. Département de l'agriculture des États-Unis, Service des forêts, Station de recherche des montagnes Rocheuses, Moscou, ID (en ligne sur http://forest.moscowfsl.wsu.edu/fswepp/ermit/peakflow, (dernière consultation le 30 janvier 2012).

Etheredge, D., Gutzler, DS, Pazzaglia, FJ, 2004. Réponse géomorphique aux variations saisonnières des précipitations dans le sud-ouest des États-Unis. Geological Society of America Bulletin 116, 606–618.

Commission européenne, 2012. Incendies de forêt en Europe, au Moyen-Orient et en Afrique du Nord. EUR 25483 FR. Office des publications de l'Union européenne, Luxembourg (109 pp.).

Feldman, AD, 2000. HEC-1 Flood Hydrograph Package. Dans : Singh, VP (éd.), Computer Models of Watershed Hydrology. Water Resources Publications, Highlands Ranch, CO, pp. 119–150.

Ferreira, AJD, Coelho, COA, Bolet, AK, Leighton-Boyce, G., Keizer, JJ, Ritsema, CJ, 2005. Influence de l'intensité du brûlage sur la répulsion de l'eau et les processus hydrologiques dans les sites forestiers et arbustifs au Portugal. Australian Journal of Soil Research 43, 327–336.

Fiedler, FR, Ramirez, JA, 2000. Une méthode numérique pour simuler un écoulement discontinu peu profond sur une surface infiltrante. Revue internationale des méthodes numériques dans les fluides 32, 219–240.

Machine Translated by Google

Finley, CD, Glenn, NF, 2010. Effets du feu et du type de végétation sur l'hydrophobicité et l'infiltration du sol dans la steppe à armoises : II. Analyse hyperspectrale. Journal of Arid Environments 74 (6), 660–666.

Finnerty, BD, Smith, MB, Koren, V., Seo, DJ, Moglen, G., 1997. Sensibilité à l'échelle spatio-temporelle du modèle de Sacramento aux données de précipitations des radars. Journal of Hydrology 203, 21–38.

Flanagan, DC, Nearing, MA, 1995. Projet de prévision de l'érosion hydrique de l'USDA, documentation sur le profil des pentes et le modèle de bassin versant. Rapport NSERL n° 10. Laboratoire national de recherche sur l'érosion des sols de l'USDA-ARS, West Lafayette, Indiana, États-Unis (298 p.).

Flannigan, MD, Stocks, BJ, Wotton, BM, 2000. Changement climatique et incendies de forêt. Science de l'environnement total 262, 221–229.

Florsheim, JL, Keller, EA, Best, DW, 1991. Transport de sédiments fluviaux en réponse à des écoulements de tempête modérés suite à un feu de forêt de chaparral, comté de Ventura, sud de la Californie. Geological Society of America Bulletin 103, 504–511.

Foltz, RB, Robichaud, PR, Rhee, H., 2009. Une synthèse des traitements routiers post-incendie pour les équipes BAER : méthodes, efficacité du traitement et outils d'aide à la décision pour la réhabilitation. Rapport technique général, RMRS-GTR-228. Département américain de l'agriculture, Service des forêts, Station de recherche des Rocheuses, Fort Collins, CO (152 pp.).

Foster, GR, Meyer, LD, 1972. Une équation d'érosion du sol sous forme fermée pour les zones de hautes terres. Dans : Shen, HW (éd.), Sédimentation : Symposium en l'honneur du professeur HA Einstein. Université d'État du Colorado, Fort Collins, CO, pp. 12.1–12.19.

Foster, GR, Meyer, LD, Onstad, CA, 1977. Une équation d'érosion dérivée de la théorie de base principes d'érosion. Transactions de l'ASAE 20 (4), 678–682.

Foster, GR, McCool, DK, Renard, KG, Moldenhauer, WC, 1981. Conversion de l'équation universelle de perte de sol en unités métriques SI. Journal of Soil and Water Conservation 36 (6), 355–359.

Foster, GR, Flanagan, DC, Nearing, MA, Lane, LJ, Risse, LM, Finkner, SC, 1995. Composante de l'érosion des pentes, chap. 11. Dans : Flanagan, DC, Nearing, MA (éd.), USDA-Water Erosion Prediction Project, Hillslope profile and watershed Model Documentation, NSERL Report no. 10, West Layfayette, Indiana, pp. 11-1–11-12.

Foufoula-Georgiou, E., Krajewski, W., 1995. Progrès récents dans la modélisation, l'estimation et la prévision des précipitations. Rapport national des États-Unis à l'Union géodésique et géophysique internationale 1991-1994 : Revue de géophysique, supplément, pp. 1125-1137.

Fox, DM, Darboux, F., Carrega, P., 2007. Effets de l'hydrofugation induite par le feu sur la stabilité des agrégats du sol, l'érosion par éclaboussures et la conductivité hydraulique saturée pour différentes fractions granulométriques. Hydrological Processes 21, 2377–2384.

Gabet, EJ, 2003a. Coulées de débris minces après incendie : transport de sédiments et modélisation numérique. Earth Surface Processes and Landforms 28, 1341–1348.

Gabet, EJ, 2003b. Transport de sédiments par ravel sec. Journal of Geophysical Research 108, 2049. http://dx.doi.org/10.1029/2001JB001686 (8 p.).

Gabet, EJ, Dunne, T., 2003. Détachement des sédiments par la force de la pluie. Water Resources Research 39 (1), 1-1–1-12. http://dx.doi.org/10.1029/2001WR000656.

Gabet, EJ, Mudd, SM, 2006. La mobilisation des coulées de débris provenant de glissements de terrain peu profonds. Géomorphologie 74, 207–218.

Gabet, EJ, Sternberg, P., 2008. Les effets des cendres végétales sur la capacité d'infiltration, le transport des sédiments et la génération de flux progressivement volumineux. Geomorphology 101, 666–673.

Gallaway, JM, Martin, YE, Johnson, EA, 2009. Transport de sédiments dû au déplacement des racines des arbres : intégration de la dynamique des populations d'arbres, des feux de forêt et de la réponse géomorphique. Processus de surface de la Terre et reliefs 34 (9), 1255–1269.

García-Ruiz, JM, Arnáez, J., Gómez-Villard, A., Ortigosa, L., Lana-Renault, N., 2012. Coulées de débris liées aux incendies dans la Cordillère Ibérique, Espagne. Géomorphologie. http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.03.032 .

Gartner, JE, Bigio, ER, Cannon, SH, 2004. Compilation de données sur les événements de ruissellement après les feux de forêt dans l'ouest des États-Unis. (Rapport en ligne USGS Open-File 2004–1085, http://pubs.usgs.gov/of/2004/1085 [consulté le 14 janvier 2004]).

Gartner, JE, Cannon, SH, Santi, PM, deWolf, VG, 2008. Modèles empiriques pour prédire les volumes de coulées de débris générés par les bassins récemment brûlés dans l'ouest des États-Unis. Geomorphology 96, 339–354.

Germanoski, D., Miller, JR, Latham, D., 2002. L'importance du séquençage des événements sur l'impact géomorphique des feux de forêt dans le centre du Grand Bassin. Geological Society of America, Abstracts With Programs 34, 319.

Germer, K., Braun, J., 2011. Effets de la saturation sur la stabilité des pentes : expériences en laboratoire utilisant une charge externe. Vadose Zone Journal 10, 447–486.

Giovannini, G., Lucchesi, S., 1983. Effet du feu sur les propriétés hydrophobes et cimentaires substances des agrégats du sol. Soil Science 136, 231–236.

Giovannini, G., Lucchesi, S., Giachetti, M., 1988. Effets du chauffage sur certains paramètres physiques et chimiques liés à l'agrégation et à l'érodibilité du sol. Soil Science 146, 255–261.

Goforth, BR, Graham, RC, Hubbert, KR, Zanner, CW, Minnich, RA, 2005. Distribution spatiale et propriétés des cendres et des sols thermiquement altérés après un incendie de forêt de forte intensité dans le sud de la Californie. International Journal of Wildland Fire 14, 343–354.

Gomez, B., 1991. Transport de charge de fond. Earth-Science Reviews 31, 89–132.

González-Bororino, G., Osterkamp, WR, 2004. Application de RUSLE 2.0 sur les terres forestières brûlées : une évaluation. Journal of Soil and Water Conservation 59 (1), 36–42.

Goode, JR, Luce, CH, Buffington, JM, 2012. Apport accru de sédiments dans un climat changeant dans les bassins de montagne semi-arides : implications pour la gestion des ressources en eau et l'habitat aquatique dans les montagnes Rocheuses du Nord. Géomorphologie 139–140, 1–15.

Green, WA, Ampt, GA, 1911. Études sur la physique des sols : 1. Le flux d'air et d'eau à travers les sols. Journal of Agriculture Science 4, 1–24.

Grell, GA, Dudhia, J., Stauffer, DR, 1994. Une description du modèle méso-échelle Penn State/NCAR de cinquième génération (MM5). Note technique du NCAR, NCAR/TN-398+STR. Division de météorologie méso-échelle et micro-échelle, Centre national de recherche atmosphérique, Boulder, CO.

Gyssel, G., Poesen, J., Bochet, E., Li, Y., 2005. Impact des racines des plantes sur la résistance des sols à l'érosion hydrique : une revue de la littérature. Progress in Physical Geography 29, 189–217.

Hairsine, PB, Rose, CW, 1992. Modélisation de l'érosion hydrique due à un ruissellement excessif à l'aide de principes physiques : 2. Écoulement en rigoles. Water Resources Research 28 (1). http://dx.doi.org/10.1029/91WR02381 .

Hanshaw, MN, Schmidt, KM, Jorgensen, DP, Stock, JD, 2008. Par voie aérienne et terrestre : estimation de la susceptibilité aux coulées de débris après incendie grâce à la réflectivité radar à haute résolution et aux précipitations mesurées par des jauges à augets basculants. EOS Transactions AGU, Supplément de la réunion d'automne 2008, résumé H51D-0850.

Hardy, CC, Menakis, JP, Long, DG, Brown, JK, 1998. Cartographie des régimes d'incendie historiques pour l'ouest des États-Unis : intégration de la télédétection et des données biophysiques. Dans : Greer, JD (éd.), Actes de la 7e Conférence sur les applications de la télédétection du Service forestier ; 6-10 avril 1998, Nassau Bay, Texas. Bethesda, MD, American Society of Photogrammetry and Remote Sensing, pp.

Harris, D., Menabde, M., Seed, A., Austin, G., 1998. Coefficients de décomposition et propriétés d'échelle des champs de pluie. Processus non linéaires en géophysique 5, 93–104.

Hassanizadeh, SM, Celia, MA, Dahle, HK, 2002. Effet dynamique sur la relation pression capillaire-saturation et ses impacts sur l'écoulement non saturé. Vadose Zone Journal 1, 38–57.

Hawkins, RH, 1973. Amélioration de la prévision du ruissellement des eaux pluviales dans les bassins versants de montagne. Journal de la division de l'irrigation et du drainage, Actes de l'American Society of Civil Engineers 99, 519–523.

Hawkins, RH, 1982. Interprétations de la variabilité de la zone source dans les relations pluies-ruissellement. Symposium international sur la modélisation des précipitations et du ruissellement. Water Resources Publication, Littleton, CO, pp. 303–324.

Hawkins, RH, 1993. Détermination asymptotique des nombres de courbes de ruissellement à partir des données. Journal d'ingénierie de l'irrigation et du drainage 119 (2), 334–345.

Hawkins, RH, Greenberg, RJ, 1990. Modèle de flux WILDCAT4. École des ressources naturelles renouvelables. Université de l'Arizona, Tucson, AZ.

HEC-RAS, 2012. Manuels d'utilisation. Disponible sur http://www.hec.usace.army.mil/.

Heede, BH, Harvey, MD, Laird, JR, 1988. Liens de transport de sédiments dans un bassin versant de chaparral après un incendie de forêt. Environmental Management 12 (3), 349–358.

Heinselman, ML, 1981. Intensité et fréquence des incendies comme facteurs de répartition et de structure des écosystèmes nordiques. Régimes d'incendie et propriétés des écosystèmes : actes de la conférence ; 11-15 décembre 1978 ; Honolulu. Rapport technique général WO-26. Département de l'agriculture des États-Unis, Service des forêts, Washington, DC, pp. 7-57.

Helvey, JD, 1980. Effets d'un incendie de forêt dans le centre-nord de Washington sur le ruissellement et la production de sédiments. Water Resources Bulletin 16 (4), 627–634.

Henz, JF, 1973. Caractéristiques des tempêtes convectives violentes sur les hautes plaines du Colorado. Pré-impression pour la huitième conférence sur les tempêtes locales violentes, American Meteorological Society, 15-17 octobre 1973, Denver, CO, pp. 96-103.

Hershfield, DM, 1961. Atlas des fréquences des précipitations aux États-Unis pour une durée de 30 minutes à 24 heures et des périodes de retour de 1 à 100 ans. Département du Commerce des États-Unis, Document technique n° 40. (107 pp.).

Heyerdahl, EK, Alvarado, E., 2003. Influence du climat et de l'utilisation des terres sur les incendies de surface historiques dans les forêts de pins et de chênes, Sierra Madre occidentale, Mexique. Dans : Veblen, TT, Baker, WL, Montenegro, G., Swetnam, TW (éd.), Incendies et changements climatiques dans les écosystèmes tempérés des Amériques occidentales. Springer, New York, pp. 196–217.

Hillel, D., 1998. Physique environnementale des sols. Academic Press, New York 385–426.

Horton, RE, 1939. Analyse des expériences de parcelles de ruissellement avec une capacité d'infiltration variable. Eos, Transactions American Geophysical Union 20, 693–711 (Partie IV).

Huff, FA, 1967. Distribution temporelle des précipitations lors de fortes tempêtes. Ressources en eau Recherche 3 (4), 1007–1019.

Huffman, EL, MacDonald, LH, Stednick, JD, 2001. Résistance et persistance de l'hydrophobicité du sol induite par le feu sous les pins ponderosa et les pins tordus, Colorado Front Range. Hydrological Processes 15, 2877–2892.

Humphreys, GS, Craig, FG, 1981. Effets du feu sur les propriétés chimiques, structurales et hydrologiques du sol. Dans : Gill, AM (éd.), Fire and the Australian Biota. Australian Academy of Science, Canberra, Australie, pp. 177–200.

Hungerford, RD, Frandsen, WH, Ryan, KC, 1996. Transfert de chaleur dans le sol végétal et organique. Département de l'agriculture des États-Unis, Service des forêts, Station de recherche intermontagneuse, Missoula, Montana, Rapport final du projet, Accord FWS n° 14-48-0009-92-962.

Imeson, AC, Verstraten, JM, van Mullegen, EJ, Sevink, J., 1992. Les effets de la résistance au feu et à l'eau sur l'infiltration et le ruissellement dans les forêts de type méditerranéen. Chaîne 19, 345–361.

Inbar, M., Tamir, M., Wittenberg, L., 1998. Processus de ruissellement et d'érosion après un incendie de forêt au Mont Carmel, une région méditerranéenne. Géomorphologie 24, 17–33.

Institution of Engineers, Australie, 1998. Pluies et ruissellement en Australie : guide d'estimation des crues. Dans : Pilgrim, DH (éd.), (édition réimprimée, Barton, ACT).

Comité consultatif interinstitutions sur les données relatives à l'eau, 1981. Directives pour la détermination de la fréquence des crues. US Geological Survey Bulletin, 17B (28 pp.).

Iverson, RM, 1997. La physique des coulées de débris. Reviews of Geophysics 35, 245–296.

Jackson, M., Roering, JJ, 2009. Réponse géomorphique post-incendie dans les paysages forestiers escarpés : chaîne côtière de l'Oregon, États-Unis. Quaternary Science Reviews 28, 1131–1146.

Jarrett, RD, Angleterre, JF Jr, 2002. Fiabilité des indicateurs de paléostades pour les études de paléoinondation. Inondations anciennes, dangers modernes : principes et applications de l'hydrologie des paléo-inondations, science de l'eau et application. American Geophysical Union, 5 91–109.

Jarrett, AR, Fritton, DD, 1978. Effets de l'air emprisonné dans le sol sur l'infiltration. Transactions de l'ASAE 21, 901–906.

Jiang, Y., Zhuang, Q., Flannigan, MD, Little, JM, 2009. Caractérisation des régimes d'incendies de forêt dans les écosystèmes terrestres boréaux canadiens. International Journal of Wildland Fire 18, 992–1002.

Johansen, MP, Hakonson, TE, Breshears, DD, 2001. Ruissellement et érosion après incendie à partir de la simulation des précipitations : comparaison entre forêts, zones arbustives et prairies. Hydrological Processes 15, 2953–2965.

Machine Translated by Google

Jorgensen, DP, Hanshaw, MN, Schmidt, KM, Laber, JL, Staley, DM, Kean, JW, 2011.
Valeur d'un radar à double polarisation à remplissage de vide pour soutenir les alertes de coulées de débris après incendie dans le sud de la Californie. Journal of Hydrometeorology. http://dx.doi.org/10.1175/JHM-D-11-05-1 .

Karunarathna, AK, Moldrup, P., Kawamoto, K., de Jonge, LW, Komatsu, T., 2010. Modèle à deux régions pour la répulsion de l'eau du sol en fonction du potentiel matriciel et de la teneur en eau. Vadose Zone Journal 9, 719–730.

Kean, JW, Staley, DM, Cannon, SH, 2011. Mesures in situ des coulées de débris après incendie dans le sud de la Californie : comparaisons de la chronologie et de l'ampleur de 24 événements de coulées de débris avec les conditions de précipitations et d'humidité du sol. Journal of Geophysical Research 116. http://dx.doi.org/10.1029/2011JF002005 (F04019).

Keeley, JE, 2009. Intensité du feu, gravité du feu et gravité des brûlures : bref aperçu et suggestions d'utilisation. International Journal of Wildland Fire 18, 116–126.

Keeley, JE, Brennan, T., Pfaff, AH, 2008. Gravité des incendies et réponses des écosystèmes suite aux incendies de cimes dans les zones arbustives de Californie. Ecological Applications 18, 1530–1546.

Keizer, JJ, Coelho, COA, Shakesby, RA, Domingues, CSP, Malvar, MC, Perez, IMP, Matias, MJS, Ferreira, AJD, 2005. Le rôle de la répulsion de l'eau du sol dans la génération de ruissellement dans les peuplements forestiers de pins et d'eucalyptus sur la côte portugaise. Australian Journal of Soil Research 43, 337–349.

Key, CH, Benson, NC, 2004. Évaluation du paysage : télédétection de la gravité, le taux de brûlage normalisé ; et mesure de la gravité au sol, l'indice de brûlage composite. Dans : Lutes, DC, Keane, RE, Caratti, JF, Key, CH, Benson, NC, Gangi, LJ
(éd.), FIREMON : Système de surveillance et d'inventaire des effets du feu, Ogden, UT, Département de l'agriculture des États-Unis, Service des forêts, Station de recherche des montagnes Rocheuses, Rapport technique général RMRS-GTR-164-CD ; LA-1-55.

Kharuk, VI, Dvinskaya, ML, Ranson, KJ, 2012. Intervalles de retour des incendies dans la limite nord de la forêt de mélèzes en Sibérie centrale. Revue internationale des incendies de forêt 22 (2), 207–211.

King, PM, 1981. Comparaison des méthodes de mesure de la sévérité de l'hydrofugation des sols sableux et évaluation de certains facteurs qui affectent sa mesure. Australian Journal of Soil Research 19, 275–285.

Kinner, DA, Moody, JA, 2008. Mesures d'infiltration et de ruissellement sur des pentes abruptes brûlées à l'aide d'un simulateur de précipitations avec des intensités de pluie variables. Rapport d'enquête scientifique 2007–5211 de l'US Geological Survey. (64 pp.).

Kinner, DA, Moody, JA, 2010. Variabilité spatiale de l'infiltration à l'état stable dans un système de sol à deux couches sur des pentes de collines brûlées. Journal of Hydrology 381, 322–332.

Kirkby, MJ, 1976. Test du modèle de réseau aléatoire et son application au bassin hydrologie. Earth Surface Processes 1, 197–212.

Kirkby, MJ, 2011. Synthèse et commentaire personnels, hydro-géomorphologie, érosion et sédimentation. Dans : Kirkby, MJ (éd.), Benchmark Papers in Hydrology, 6.
Association internationale des sciences hydrologiques, AISH, pp. 1–36.

Kitzberger, T., Veblen, TT, 2003. Influences du climat sur les incendies dans le nord de la Patagonie. Dans : Veblen, TT, Baker, WL, Montenegro, G., Swetnam, TW (éd.), Incendies et changements climatiques dans les écosystèmes tempérés des Amériques occidentales. Springer, New York, pp. 296–321.

Kokaly, RF, Rockwell, BW, Haire, SL, King, TVV, 2007. Caractérisation de la couverture de surface, des sols et de la gravité des brûlures après l'incendie de Cerro Grande, au Nouveau-Mexique, à l'aide de la télédétection hyperspectrale et multispectrale. Remote Sensing of Environment 106, 305–325.

Krammes, JS, 1965. Déplacement saisonnier des débris sur les pentes abruptes des montagnes du sud de la Californie. Federal Inter-Agency Sedimentation Conference, Miscella-neous Publication US Department of Agriculture, 970, pp. 85–88.

Krammes, JS, DeBano, LF, 1965. Mouillabilité du sol : un facteur négligé dans les bassins versants gestion. Water Resources Research 1 (2), 283–286.

Krammes, JS, Osborn, J., 1969. Sols hydrofuges et agents mouillants comme facteurs influençant l'érosion. Dans : Debano, LF, Letey, J. (éd.), Sols hydrofuges, actes du symposium sur les sols hydrofuges. Université de Californie, Riverside, CA, pp. 177–187.

Krawchuk, MA, Moritz, MA, 2009. Régimes d'incendies en Chine : inférence à partir d'une comparaison statistique avec les États-Unis. Global Ecology and Biogeography 18, 626–639.

Krebs, P., Pezzatti, GB, Massoleni, S., Talbot, LM, Conedera, M., 2010. Régimes de feu : historique et définition d'un concept clé en écologie des perturbations. Theory in Biosciences 129, 53–69.

Kunze, MD, Stednick, JD, 2006. Écoulement fluvial et apport de sédiments en suspension après l'incendie Bobcat de 2000, Colorado. Hydrological Processes 20, 1661–1681.

Kutílek, M., 1980. Infiltration due à des précipitations constantes. Journal of Hydrology 45, 289–303.

Lamb, MP, Dietrich, WE, Venditti, JG, 2008. La contrainte critique de Shields pour le mouvement incipient des sédiments dépend-elle de la pente du lit du chenal ? Journal of Geophysical Research 113. http://dx.doi.org/10.1029/2007/JF000831.

Lamb, MP, Scheingross, JS, Amidon, WH, Swanson, E., Limaye, A., 2011. Un modèle de production de sédiments induite par le feu par ravel sec dans des paysages escarpés. Journal of Geophysical Research 116 (F03006).

Lane, PNJ, Sheridan, GJ, Noske, PJ, 2006. Modifications des charges et des rejets de sédiments des petits bassins versants de montagne après un incendie de forêt dans le sud-est de l'Australie.
Journal d'hydrologie 331, 495–510.

Lane, PNJ, Sheridan, GJ, Noske, PJ, Sherwin, CB, Costenaro, JL, Nyman, P., Smith, HG, 2012. Effets du feu sur l'hydrologie forestière : enseignements d'une expérience de bassin versant à plusieurs échelles dans le sud-est de l'Australie, IAHS Publ. 353. Revisiter les études expérimentales de bassin versant en hydrologie forestière : actes d'un atelier tenu lors de la XXVe Assemblée générale de l'IUGG à Melbourne, juin-juillet 2011, pp. 137-143.

Lanini, JS, Clark, EA, Lettenmaier, DP, 2009. Effets du moment des précipitations et du régime de sédimentation après incendie dans la forêt du nord-ouest du Pacifique. Geophysical Research Letters 36, LO1402. http://dx.doi.org/10.1029/2008GL034588.

Larsen, IJ, 2003. Du bord à la rivière : la géomorphologie des coulées de débris dans les canyons de la Green River du Dinosaur National Monument, Colorado et Utah. MS
Thèse, Utah State University, Logan UT, 196 pp.

Larsen, IJ, MacDonald, LH, Brown, E., Rough, D., Welsh, MJ, Pietraszek, JH, Libohova, Z., Benavides-Solorio, J., Schaffrath, K., 2009. Causes du ruissellement et de l'érosion après un incendie : rôles de la répulsion de l'eau du sol, de la couverture de surface et de l'imperméabilisation du sol ? Soil Science Society of America Journal 73, 1393–1407.

Lawrence, DSL, 1997. Rugosité de surface à macroéchelle et résistance au frottement dans les écoulements de surface. Earth Surface Processes and Landforms 22, 365–382.

Leavesley, GH, Hay, L., 1998. Utilisation de modèles atmosphériques et hydrologiques couplés pour la gestion des ressources en eau dans les bassins hydrographiques supérieurs. Dans : Kovar, K., Tappeiner, U., Peters, NE, Craig, RG (éd.), Hydrology, Water Resources and Ecology in Headwaters : IAHS Publication No. 248, pp. 259–265.

Lehmann, P., Hinz, C., McGrath, G., Tromp-van Meerveld, H.J., McDonnell, J.J., 2007.
Seuil de précipitations pour l'écoulement des pentes : une propriété émergente de la connectivité des voies d'écoulement. Hydrologie et sciences du système terrestre 11, 1047–1063.

Letey, J., Carrillo, MLK, Pang, XP, 2000. Approches pour caractériser le degré de hydrofugation. Journal of Hydrology 231–232, 61–65.

Lewis, SA, Robichaud, PR, Frazier, BE, Wu, JQ, Laes, DYM, 2008. Utilisation de l'imagerie hyperspectrale pour prédire la résistance à l'eau du sol après un incendie de forêt. Géomorphologie 95, 192–205.

Linsley, RK, 1958. Corrélation de l'intensité des précipitations et de la topographie dans le nord de la Californie. Eos, Transactions Union géophysique américaine 39 (1), 15–18.

Littell, JS, McKenzie, D., Peterson, DL, Westerling, AL, 2009. Climat et superficie des feux de forêt dans les écoprovinces de l'ouest des États-Unis, 1916-2003. Applications écologiques 19, 1003–1021.

Loomis, J., Wohlgemuth, P., González-Cabán, A., 2003. Avantages économiques de la réduction des sédiments liés aux incendies dans les écosystèmes du sud-ouest sujets aux incendies. Water Resources Research 39 (8). http://dx.doi.org/10.1029/2003WR002176.

Lu, H., Gallant, J., Prosser, IP, Moran, C., Priestley, G., 2001. Prédiction de l'érosion en nappe et en rigoles sur le continent australien, intégrant la distribution mensuelle des pertes de sol.
Rapport technique 13/01.CSIRO Land and Water, Canberra, Australie Disponible sur : http://www.clw.csiro.au/publications/technical2001/tr13-01.pdf.

Malamud, BD, Millington, JDA, Perry, GLW, 2005. Caractérisation des régimes d'incendies de forêt aux États-Unis. Actes de l'Académie nationale des sciences des États-Unis d'Amérique 102 (13), 4694–4699.

Mallik, AU, Gimingham, CH, Rahman, AA, 1984. Effets écologiques du brûlage des bruyères, I. Infiltration d'eau, rétention d'humidité et porosité du sol de surface. Journal of Ecology 72, 767–776.

Martin, DA, Moody, JA, 2001. Comparaison des taux d'infiltration du sol dans les bassins versants montagneux brûlés et non brûlés. Hydrological Processes 15, 2893–2903.

Martin, Y., Valeo, C., Tait, M., 2008. Représentations numériques à l'échelle centimétrique du terrain et impacts sur le stockage et le ruissellement des dépressions. Catena 75 (2), 223–233.

Mataix-Solera, J., Cerdà, A., Arcenegui, V., Jordán, A., Zavala, LM, 2011. Effets du feu sur agrégation du sol : une revue. Earth-Science Reviews 109, 44–60.

Matrosov, SY, Cifelli, R., Gochis, D., 2013. Mesures de fortes précipitations convectives en présence de grêle dans les zones inondables à l'aide d'un radar polarimétrique X-ban. Journal of Applied Meteorology and Climatology 52, 395–407.

Mayor, AG, Bautista, S., Llovet, J., Bellot, J., 2007. Réponses hydrologiques et érosionnelles post-incendie d'un paysage méditerranéen : sept années de dynamique à l'échelle du bassin versant.
Chaîne 71, 68–75.

Mayor, AG, Bautista, S., Small, EE, Dixon, M., Bellot, J., 2008. Mesure de la connectivité des zones sources de ruissellement selon le modèle de végétation et la topographie : un outil d'évaluation des pertes potentielles d'eau et de sol dans les zones arides. Water Resources Research 44, W10423. http://dx.doi.org/10.1029/2007WR006367 (13 pp.).

McCoy, S.-W., Kean, J.-W., Coe, J.-A., Tucker, G.E., Staley, D.M., Wasklewicz, T.A., 2012.
Entraînement de sédiments par des coulées de débris : mesures in situ à partir de la source d'un bassin versant abrupt. Journal of Geophysical Research 117. http://dx.doi.org/10.1029/2011JF002278 (25 pp.).

Mein, RG, Larson, CL, 1973. Modélisation de l'infiltration lors d'une pluie constante. Water Resources Research 9 (2), 384–394.

Menabde, M., Harris, D., Seed, AW, Austin, GL, Stow, CD, 1997. Propriétés multi-échelles des précipitations et des cascades aléatoires délimitées. Water Resources Research 33 (12), 2823–2830.

Menéndez-Duarte, R., Fernández, S., Soto, J., 2009. L'application du 137Cs à l'érosion post-incendie dans le nord-ouest de l'Espagne. Geoderma 150, 54–63.

Meyer, GA, Wells, SG, 1997. Événements de sédimentation liés au feu sur les cônes alluviaux, parc national de Yellowstone, États-Unis. Journal of Sedimentary Research 67, 776–791.

Meyer, GA, Wells, SG, Jull, AJT, 1995. Chronologie des incendies et des alluvions dans le parc national de Yellowstone : contrôles climatiques et intrinsèques sur les processus géomorphiques de l'Holocène. Bulletin de la Société géologique d'Amérique 107 (10), 1211–1230.

Miller, JF, Frederick, RH, Tracey, RJ, 1973. Atlas des précipitations et de la fréquence des précipitations dans l'ouest des États-Unis, Colorado, NOAA Atlas 2, vol. III National Weather Service (67 pp.).

Milly, PCD, Wetherald, RT, 2002. Flux d'eau à macroéchelle 3. Effets des processus terrestres sur la variabilité du débit mensuel des rivières. Water Resources Research 38 (11), 17-1–17-12. http://dx.doi.org/10.1029/2001WR000761.

Milzow, C., Kinzelbach, WK, 2010. Prise en compte des variations topographiques à l'échelle sous-maille dans la modélisation de la propagation des crues à l'aide de MODFLOW. Water Resources Research 46. http://dx.doi.org/10.1029/2009WR008088 W10521.

Mockus, V., 1972. Estimation du ruissellement direct des précipitations d'orage. Manuel national d'ingénierie du NRCS, section 4, chapitre 10. Département de l'agriculture des États-Unis, Washington, DC, 10-1–10-24.

Montes-Helu, MC, Kolb, T., Dore, S., Sullivan, B., Hart, SC, Koch, G., Hungate, BA, 2009. Effets persistants des changements de végétation induits par les incendies sur la répartition de l'énergie et l'évapotranspiration dans les forêts de pins ponderosa. Agricultural and Forest Meteorology 149 (3–4), 491–500.

Montgomery, DR, Dietrich, WE, 1988. Où commencent les canaux ? Nature 336, 232–234.

Moody, JA, 2010. Processus de transport de sédiments à l'échelle d'une parcelle sur une pente de colline brûlée en fonction de la taille des particules. Actes de la 9e Conférence fédérale interinstitutions sur la sédimentation, 27 juin-1er juillet 2010, Las Vegas, NV. (12 pp.).

Machine Translated by Google

Moody, JA, 2012. Une méthode analytique pour prédire les débits de pointe après un incendie de forêt. Rapport d'enquête scientifique 2011–5236 de l'US Geological Survey. (36 pp.).
Moody, JA, Ebel, BA, 2012a. Les conditions d'hyper-sécheresse apportent de nouvelles perspectives sur la cause des inondations extrêmes après un incendie de forêt. Catena 93, 58–63.
Moody, JA, Ebel, BA, 2012b. Infiltromètre différentiel : une méthode pour mesurer les taux d'infiltration variables dans le temps pendant les orages. Processus hydrologiques. http://dx.doi.org/10.1002/hyp.9424 .

Moody, JA, Kinner, DA, 2006. Structures spatiales des réseaux de drainage des cours d'eau et des pentes des collines après l'érosion en ravines après un feu de forêt. Earth Surface Processes and Landforms 31, 319–337.

Moody, JA, Martin, DA, 2001a. Relations entre l'intensité des précipitations et le débit maximal après incendie pour trois bassins versants montagneux de l'ouest des États-Unis. Hydrological Processes 15, 2981–2993.

Moody, JA, Martin, DA, 2001b. Réponse hydrologique et géomorphique initiale suite à un incendie de forêt dans le Front Range du Colorado. Earth Surface Processes and Landforms 26, 1049–1070.

Moody, JA, Martin, DA, 2001c. Réponse hydrologique et sédimentologique de deux bassins versants brûlés dans le Colorado. Rapport d'enquête sur les ressources en eau géologiques des États-Unis 01–4122. (142 pp.).

Moody, JA, Martin, DA, 2004. Incidence des feux de forêt sur la sédimentation des réservoirs dans l'ouest des États-Unis. Actes du neuvième symposium international sur la sédimentation fluviale, 18-21 octobre 2004, Yichang, Chine, pp. 1095-1102.
Moody, JA, Martin, DA, 2009a. Synthèse des rendements sédimentaires après incendie de forêt dans différents régimes pluviométriques dans l'ouest des États-Unis. International Journal of Wildland Fire 18, 96–115.

Moody, JA, Martin, DA, 2009b. Effets des feux de forêt sur les processus géomorphologiques. Dans : Robichaud, PR, Cerdà, A. (éd.), Effets des feux sur les sols et stratégies de restauration. Éditeurs scientifiques, New Hampshire, Enfield, NH, pp. 41–79.
Moody, JA, Nyman, P., 2012. Variations de l'érodabilité du sol en fonction de la profondeur après un feu de forêt. Rapport d'enquête scientifique de la Commission géologique 2012–5233.
Moody, JA, Smith, JD, Ragan, BW, 2005. Contrainte de cisaillement critique pour l'érosion des sols cohérents soumis à une température typique des feux de forêt. Journal of Geophysical Research 110, FO1004. http://dx.doi.org/10.1029/2004JF000141 (13 pp.).
Moody, JA, Martin, DA, Oakley, TM, Blanken, PD, 2007. Variabilité temporelle et spatiale de la température et de l'humidité du sol après un incendie de forêt. US Geological Survey, Scientific Investigations Report 2007–5015. (89 pp.).
Moody, JA, Martin, DA, Haire, SL, Kinner, DA, 2008a. Lien entre la réponse au ruissellement et la gravité des brûlures après un feu de forêt. Hydrological Processes 22, 2063–2074.
Moody, JA, Martin, DA, Cannon, SA, 2008b. Réponse à l'érosion après un incendie de forêt dans deux terrains géologiques de l'ouest des États-Unis. Géomorphologie 95, 103–118.
Moody, JA, Kinner, DA, Úbeda, X., 2009. Lien entre les propriétés hydrauliques des sols affectés par le feu et l'infiltration et la répulsion de l'eau. Journal of Hydrology 379, 291–303.
Moreno, HA, Vivoni, ER, Gochis, DJ, 2012. Utilité des estimations quantitatives des précipitations pour les prévisions hydrologiques à haute résolution dans le bassin versant montagneux du Colorado Front Range. Journal of Hydrology 438–439. http://dx.doi.org/10.1016/ j.jhydrol.2012.03.019 (66–83).

Moritz, MA, Moody, TJ, Krawchuk, MA, Hughes, M., Hall, A., 2010. La variation spatiale des vents extrêmes prédit les emplacements des grands feux de forêt dans les écosystèmes de chaparral. Geophys-ical Research Letters 37, L04801. http://dx.doi.org/10.1029/2009GL041735.
Moss, AJ, 1988. Effets de la variation de la vitesse d'écoulement sur le transport par la pluie et le rôle de l'impact de la pluie dans le mouvement des solides. Australian Journal of Soil Research 26, 443–450.

Murphy, BP, Williamson, GJ, Bowman, DMJS, 2011. Régimes d'incendie : passer d'un concept flou à une entité géographique. New Phytologist 192, 316–318.
Nachabe, MH, Illangasekare, TH, Morel-Seytoux, HJ, Ahuja, LR, 1997. Infiltration dans des bassins versants hétérogènes : influence de l'excès de pluie. Journal of Hydrologic Engineering 2 (3), 140–143.

Nakagoshi, N., Nehira, K., Takahashi, F., 1987. Le rôle du feu dans les forêts de pins du Japon. Dans : Trabaud, L. (éd.), Le rôle du feu dans les systèmes écologiques. SPB Academic Publishing, La Haye, Pays-Bas, pp.

Neary, DG, 2011. Impacts de la gravité des feux de forêt sur la conductivité hydraulique des sols forestiers, boisés et herbeux. Dans : Elange, L. (éd.), Conductivité hydraulique — Problèmes, détermination et application. InTech Publishers, Rijeka, Croatie, pp. 123–142.
Neary, DG, Gottfried, GJ, 2002. Incendies et inondations : réponses post-incendie aux niveaux des bassins versants. Dans : Viegas, VR (éd.), Forest Fire Research & Wildland Fire Safety. Millpress, Rotterdam, pp. 1–9.
Neary, DG, Ryan, KC, DeBano, LF, 2005. Incendies de forêt dans les écosystèmes, effets des incendies sur le sol et l'eau. Département de l'agriculture des États-Unis, Station de recherche des montagnes Rocheuses du Service forestier, Fort Collins. Rapport technique général RMRS-GTR-42-volume 4 (250 p.).

Nicks, AD, Lane, LJ, Gander, GA, 1995. Générateur météorologique. Dans : Flanagan, DC, Nearing, MA (éd.), US Department of Agriculture—Water Erosion Prediction Project Hillslope Profile and Watershed Model Documentation. Rapport NSERL n° 10. Département de l'agriculture des États-Unis, Service de recherche agricole, Laboratoire national de recherche sur l'érosion des sols, West Lafayette, IN, pp. 1.1–2.22.
NIFC, 2011. National Interagency Fire Center, informations sur les incendies – statistiques sur les incendies de forêt. En ligne : http://www.nifc.gov/fire_info/lg_fires.htm (consulté le 12 mars 2011).
Nikora, V., Goring, D., McEwan, I., Griffiths, G., 2001. Écoulement moyen en canal ouvert sur lit rugueux. Journal of Hydraulic Engineering 127 (2), 123–133.
Nimmo, JR, Schmidt, KM, Perkin, KS, Stock, JD, 2009. Mesure rapide de la conductivité hydraulique saturée sur le terrain pour la caractérisation aréale. Vadose Zone Journal 8, 142–149.

Nishimune, N., Onodera, S., Naruoka, T., Birmano, MD, 2003. Étude comparative des processus de production de sédiments charriés dans de petits bassins versants montagneux couverts de forêts secondaires et perturbées, dans l'ouest du Japon. Hydrobiologia 494, 265–270.
NOAA, 2012. Serveur de données sur la fréquence des précipitations. Consulté en octobre 2012 http://dipper.nws.noaa.gov/hdsc/pfds/ .
Novák, V., Lichner, L., Zhang, B., Knava, K., 2009. L'impact du chauffage sur les propriétés hydrauliques des sols échantillonnés sous différentes couvertures végétales. Biologia 64, 483–486.
NRCS, 1986. Hydrologie urbaine pour les petits bassins versants. Département de l'agriculture des États-Unis, Natural Resources Conservation Services : Technical Release, 55 (159 pp.).
Nyman, P., Sheridan, G., Lane, PNJ, 2010. Effets synergétiques de la répulsion de l'eau et de l'écoulement des macropores sur la conductivité hydraulique d'un sol forestier brûlé, sud-est de l'Australie. Hydrological Processes 24, 2871–2887.
Nyman, P., Sheridan, G., Smith, HG, Lane, PNJ, 2011. Preuves de la présence de coulées de débris après un incendie de forêt dans les bassins versants des hautes terres du sud-est de l'Australie. Géomorphologie 125, 383–401.
Ogden, FL, Richardson, JR, Julien, PY, 1995. Similarité dans la réponse du bassin versant 2. Mov-pluies torrentielles. Water Resources Research 31 (6), 1543–1547.
O'Donnell, AJ, Boer, MM, McCaw, WL, Grierson, PF, 2011. La connectivité de la végétation et du paysage contrôle les intervalles entre les feux de forêt dans les zones arbustives et boisées semi-arides non gérées en Australie. Journal of Biogeography 38, 112–124.
Onda, Y., Dietrich, WE, Booker, F., 2008. Evolution du ruissellement de surface après une forte pluie est fire. Point Reyes, California. Catena 72, 13–20.
Ormsbee, LE, 1989. Désagrégation des précipitations pour la modélisation hydrologique continue. ASCE Journal of Hydraulic Engineering 115 (4), 507–528.
Overton, DE, 1970. Route ou convolute. Water Resources Research 6 (1), 43–52.
Pannkuk, CD, Robichaud, PR, 2003. Efficacité de la pulvérisation d'aiguilles pour réduire l'érosion après les incendies de forêt. Water Resources Research 39 (12). http://dx.doi.org/10.1029/2003WR002318 (9 pp.).

Parks, DS, Cundy, TW, 1989. Caractéristiques hydrauliques du sol d'un petit bassin versant du sud-ouest de l'Oregon après des incendies de forêt de forte intensité. Département de l'agriculture des États-Unis, Rapport technique général du Service des forêts. PSW-109. 63–67.
Parsons, A., Robichaud, PR, Lewis, SA, Napper, C., Clark, JT, 2010. Guide de terrain pour la cartographie de la gravité des brûlures du sol après un incendie. Rapport technique général RMRS-GTR-243. USDA Forest Service, Fort Collins (49 pp.).
Pausas, JG, Fernández-Muñoz, S., 2011. Changements dans les régimes d'incendies dans le bassin méditerranéen occidental : du régime d'incendie limité par le combustible au régime d'incendie provoqué par la sécheresse. Climatic Change 110, 215–226. http://dx.doi.org/10.1007/s10584-011-0060-6.
Pausas, JG, Llovet, J., Rodrigo, A., Vallejo, R., 2008. Journal international des incendies de forêt 17, 713–723.

Peckham, SD, 2008. Géomorphométrie et modélisation hydrologique spatiale. Dans : Hengl, T., Reuter, HI (éd.), Géomorphométrie : concepts, logiciels et applications. Chapitre 22. Développements en science des sols, vol. 33. Elsevier, pp. 377–393.
Peckham, SD, Hinzman, L., Nolan, M., 2004. Le modèle hydrologique TopoFlow : un nouveau projet communautaire, AGU Hydrology Days 2004, du 10 au 12 mars 2004. Université d'État du Colorado, Fort Collins, CO.

Pereira, P., Cerdà, A., Úbeda, X., Mataix-Solera, J., Arcenegui, V., Zavala, L., 2013. Modélisation des impacts des feux de forêt sur l'épaisseur des cendres à court terme, la dégradation des terres et le développement. http://dx.doi.org/10.1002/ldr.2195 (sous presse).
Pezzatti, GB, Zumbrunnen, T., Bürgi, M., Ambrosetti, P., Conedera, M., 2011. Changements de régime des incendies en conséquence de la politique des incendies et du développement socio-économique : une analyse basée sur l'approche du point de changement. Forest Policy and Economics. http://dx.doi.org/10.1016/j.forpol.2011.07.002.

Philip, JR, 1969. Théorie de l'infiltration. Progrès en hydroscience, 5. Academic, San Diego, Californie, pp. 215–296.
Pierce, J., Meyer, G., 2008. Historique des incendies à long terme dans les sédiments des cônes alluviaux : le rôle de la sécheresse et de la variabilité climatique, et les implications pour la gestion des forêts des montagnes Rocheuses. Revue internationale des incendies de forêt 17, 84–95.
Pierson, TC, Costa, JE, 1987. Une classification rhéologique des sédiments-eau subaériens flux. Critiques dans Engineering Geology VII, 1–12.
Pierson, FB, Robichaud, PR, Spaeth, KE, 2001. Effets spatiaux et temporels des feux de forêt sur l'hydrologie d'un bassin versant de pâturages abrupts. Hydrological Processes 15, 2905–2916.
Pierson, FB, Robichaud, PR, Moffet, CA, Spaeth, KE, Williams, CJ, Hardegree, SP, Clark, PE, 2008. Hydrofugation et infiltration de l'eau dans les sols à texture grossière des écosystèmes d'armoises brûlées et non brûlées. Catena 74, 98–108.
Pierson, FB, Moffet, CA, Williams, CJ, Hardegree, SP, Clark, PE, 2009. Effets des incendies dirigés sur le ruissellement et l'érosion des rigoles et des interrigoles dans un paysage montagneux de sauges. Earth Surface Processes and Landforms 34, 193–203.
Pietraszek, JH, 2006. Contrôle de l'érosion post-incendie à l'échelle des pentes, Colorado Front Gamme, mémoire de maîtrise. Université d'État du Colorado. 124 pp.
Pilgrim, DH (éd.), 1987. Pluies et ruissellement australiens : un guide pour l'estimation des inondations. Ingénieurs Australie, Barton, ACT.
Prosser, I., Williams, L., 1998. L'effet des feux de forêt sur le ruissellement et l'érosion dans les forêts indigènes d'eucalyptus. Hydrological Processes 12, 251–265.
Rahardjo, H., Lee, TT, Leong, EC, Rezaur, RB, 2005. Réponse d'une pente résiduelle du sol aux précipitations. Revue canadienne de géotechnique 42, 340–351.
Randerson, JT, Liu, H., Flanner, MG, Chambers, DD, Jin, Y. et al., 2006. L'impact de Les feux de forêt boréale et le réchauffement climatique. Science 314, 1130–1132.
Rawls, WJ, Brakensiek, DL, Saxton, KE, 1982. Estimation des propriétés de l'eau du sol. Transaction Société américaine des ingénieurs agricoles 25 (5), 1316–1330.
Reaney, SM, Bracken, LJ, Kirkby, MJ, 2007. Utilisation du modèle de connectivité du ruissellement (CRUM) pour étudier l'influence des caractéristiques des orages sur la production et la connectivité du ruissellement dans les zones semi-arides. Hydrological Processes 21, 894–906.
Reinhardt, E., 2012. Utilisation de FOFEM 5.0 pour estimer la mortalité des arbres, la consommation de combustible, la production de fumée et le réchauffement du sol dû aux feux de forêt . http://www.firelab.org/science-applications/fire-fuel/111-fofem Consulté en octobre 2012.
Regalado, CM, Ritter, A., 2009. Un modèle linéaire lognormal bimodal à quatre paramètres de hydrophobie du sol. Hydrological Processes 23, 881–892.
Renard, KG, 1985. Simulateurs de précipitations et recherche sur l'érosion de l'USDA : historique, perspectives et avenir. Dans : Lane, LJ (éd.), Actes de l'atelier sur les simulateurs de précipitations, 14-15 janvier 1985, Tucson, Arizona, pp. 3-6.

Machine Translated by Google

Renard, KG, Foster, GR, Weesies, GA, McCool, DK, Yoder, DC, 1997. Prévision de l'érosion des sols par l'eau : guide de planification de la conservation avec l'équation universelle révisée de perte de sol (RUSLE). Département américain de l'agriculture, Manuel agricole n° 703 (404 p.).

Reneau, SL, Kuyumjian, GA, 2004. Relations pluie-ruissellement à Pueblo Canyon, Nouveau-Mexique, après l'incendie de Cerro Grande. Rapport du laboratoire national de Los Alamos LA-UR-04-8810. (31 pp.).

Renschler, CS, Mannaerts, C., Kiekkrüger, D., 1999. Évaluation de la variabilité spatiale et temporelle du risque d'érosion des sols, des ratios d'érosion des précipitations et de perte de sol en Andalousie, Espagne. Catena 34, 209–225.

Rice, RM, 1982. Sédimentation dans le chaparral : comment gérer les événements inhabituels ? Dans : Swanson, FJ, Janda, RJ, Dunne, T., et al. (éd.), Atelier sur les bilans sédimentaires et le routage dans les bassins versants forestiers : actes : Portland, Oregon, États-Unis Département de l'agriculture, Service des forêts, Station expérimentale des forêts et des pâturages du Pacifique Nord-Ouest, Rapport technique général PNW-141, pp. 39–49.

Richards, LA, 1931. Conduction capillaire des liquides à travers des milieux poreux. Physique 1 (5), 318–333.

Ries III, KG, Crouse, MY, 2002. Le programme national de fréquence des inondations, version 3 : un programme informatique pour estimer l'ampleur et la fréquence des inondations pour les sites non vieillis. Rapport d'enquête sur les ressources en eau de l'US Geological Survey 02–4168. (42 pp.).

Rinaldo, A., Marani, A., Rigon, R., 1991. Dispersion géomorphologique. Ressources en eau Recherche 27 (4), 513–525.

Robichaud, PR, 2000. Effets du feu sur les taux d'infiltration après un brûlage dirigé dans les forêts du nord des montagnes Rocheuses, États-Unis. Journal of Hydrology 231–232, 220–229.

Robichaud, PR, Hungerford, RD, 2000. Hydrofugation par brûlage en laboratoire de quatre sols forestiers du nord des montagnes Rocheuses. Journal of Hydrology 231–232, 207–219.

Robichaud, PR, Miller, SM, 1999. Interpolation spatiale et simulation de l'épaisseur de l'humus après brûlage dirigé. Revue internationale des incendies de forêt 9 (2), 137–143.

Robichaud, PR, Lillybridge, TR, Wagenbrenner, JW, 2006a. Effets de l'ensemencement et de la fertilisation après incendie sur l'érosion des pentes dans le centre-nord de l'État de Washington, États-Unis. Catena 67, 56–67.

Robichaud, PR, Elliot, WJ, Pierson, FB, Hall, DE, Moffet, CA, 2006b. Outil de gestion des risques d'érosion (ERMiT). Ver. 2006.01.18. [Page d'accueil de l'outil de gestion des risques d'érosion ERMiT], [En ligne]. Disponible : http://forest.moscowfsl.wsu.edu/cgi-bin/fswepp/ermit/ermit.pl (2008, 3 mars).

Robichaud, PR, Elliot, WJ, Pierson, FB, Hall, DE, Moffet, CA, Ashmun, LE, 2007a. Prévision de l'érosion après incendie et efficacité des mesures d'atténuation avec un modèle d'érosion probabiliste basé sur le Web. Catena 71, 229–241.

Robichaud, PR, Lewis, SA, Laes, DYM, Hudak, AT, Kokaly, RF, Zamudio, JA, 2007b. Cartographie de la gravité des brûlures du sol après incendie avec démixage d'images hyperspectrales. Télédétection de l'environnement 108, 467–480.

Robichaud, PR, Elliot, WJ, Pierson, FB, Hall, DE, Moffett, CA, Ashmun, LE, 2007c. Manuel d'utilisation de l'outil de gestion des risques d'érosion (ERMiT) (version 2006.01.18). Rapport technique général RMRS-GTR-188. Département américain de l'agriculture, Service des forêts, Station de recherche des Rocheuses, Fort Collins, CO (24 pp.).

Robichaud, PR, Wagenbrenner, JW, Brown, RE, Wohlgemuth, PM, Beyers, JL, 2008a. Évaluation de l'efficacité des barrières anti-érosion en rondins abattus selon les contours comme traitement d'atténuation du ruissellement et de l'érosion après un incendie dans l'ouest des États-Unis. Journal international des incendies de forêt 17, 255–273.

Robichaud, PR, Pierson, FB, Brown, RE, Wagenbrenner, JW, 2008b. Mesure de l'efficacité de trois traitements anti-érosion des pentes de collines après incendie, ouest du Montana, États-Unis. Hydrological Processes 22, 159–170.

Robichaud, PR, Lewis, SA, Ashmun, LE, 2008c. Nouvelle procédure d'échantillonnage de l'infiltration pour évaluer la résistance à l'eau après un incendie. Département de l'agriculture des États-Unis, Forest Service Research Note RMRS-RN-33, US Forest Service, W10506, pp. 1–14. http://dx.doi.org/10.1029/2009WR008314.

Robichaud, PR, Wagenbrenner, JW, Brown, RE, 2010. Érosion en rigoles dans les forêts naturelles et perturbées : 1. Mesures. Water Resources Research 46 (14 pp.).

Robichaud, PR, Lewis, SA, Wagenbrenner, JW, Ashmun, LF, Brown, RE, 2013a. Paillage post-incendie pour atténuer le ruissellement et l'érosion, partie I : efficacité pour réduire les taux d'érosion des pentes. Catena. http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2012.11.015.

Robichaud, PR, Wagenbrenner, JW, Lewis, SA, Ashmun, LF, Brown, RE, Wohlgemuth, PM, 2013b. Paillage post-incendie pour atténuer le ruissellement et l'érosion, partie II : efficacité pour réduire le ruissellement et les sédiments des petits bassins versants. Catena. http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2012.11.016.

Robinson, JS, Sivapalan, M., Snell, JD, 1995. Rôles relatifs des processus de pente, du routage des chenaux et de la géomorphologie du réseau dans la réponse hydrologique des bassins versants naturels. Water Resources Research 31 (12), 3089–3101.

Rodriguez-Iturbe, I., Valdes, JB, 1979. La structure géomorphologique des sols hydrologiques réponse. Water Resources Research 15 (6), 1409–1420.

Roering, JJ, Gerber, M., 2005. Le feu et l'évolution des paysages abrupts à manteau de sol. Géologie 33, 349–352.

Romme, WH, Knight, DH, 1981. Fréquence des incendies et succession forestière subalpine le long un gradient topographique dans le Wyoming. Ecology 62 (2), 319–326.

Rowe, PB, 1948. Influence du chaparral forestier sur l'eau et le sol en Californie centrale. Station expérimentale des forêts et des pâturages de Californie. Service forestier américain, Université de Californie (70 pp.).

Rowe, PB, Countryman, CM, Storey, HC, 1954. Analyse hydrologique utilisée pour déterminer les effets des incendies sur les débits de pointe et les taux d'érosion dans les bassins versants du sud de la Californie. Service des forêts de l'USDA, Station expérimentale des forêts et des pâturages de Californie (49 p.).

Rulli, MC, Rosso, R., 2005. Modélisation de l'érosion des bassins versants après les incendies de forêt dans les montagnes de San Gabriel, dans le sud de la Californie. Geophysical Research Letters 32. http://dx.doi.org/10.1029/2005GL023635 (L19401).

Rulli, MC, Bozzi, S., Spada, M., Bocchiola, D., Rosso, R., 2006. Simulations de précipitations dans une zone méditerranéenne perturbée par un incendie. Journal of Hydrology 327, 323–338.

Ryan, KC, 2002. Interactions dynamiques entre la structure de la forêt et le comportement du feu dans écosystèmes boréaux. Silva Fennica 36 (1), 13–39.

Saco, PM, Kumar, P., 2002. Dispersion cinématique dans les réseaux de cours d'eau. 1. Couplage de la géométrie hydraulique et du réseau. Water Resources Research 38 (11), 26-1–26-14. http://dx.doi.org/10.1029/2001WR000695.

Santi, PM, deWolf, VG, Higgins, JE, Cannon, SH, Gartner, JE, 2008. Sources de matériaux de coulées de débris dans les zones brûlées. Géomorphologie 96, 310–321.

Sass, O., Heel, M., Leistner, I., Stöger, F., Wetzel, K.-F., Friedmann, A., 2012a. Perturbations, processus géomorphiques et rétablissement des pentes incendiées dans le Tyrol du Nord. Earth Surface Processes and Landforms 37, 883–894.

Sass, O., Haas, F., Schimmer, C., Heel, M., Bremer, M., Stöger, F., Wetzel, K.-F., 2012b. Impact des incendies de forêt sur les processus géomorphiques dans les Alpes calcaires du Tyrol. Annales géographiques 94, 117–133.

Scheuermann, A., 2008. Dynamique de la teneur en eau dans les sols non saturés : résultats d'études expérimentales en laboratoire et in situ. Dans : Toll, DG, Augarde, CE, Gallipoli, D., Wheeler, SJ (éd.), Unsaturated Soils: Advances in Geo-Engineering. Taylor & Francis Group, Londres, pp. 197–203.

Schmidt, KM, Roering, JJ, Stock, JD, Dietrich, WE, Montgomery, DR, Schaub, T., 2001. La variabilité de la cohésion racinaire comme influence sur la susceptibilité aux glissements de terrain peu profonds dans la chaîne côtière de l'Oregon. Revue canadienne de géotechnique 38, 995–1024.

Schmidt, KM, Hanshaw, MN, Howle, JF, Kean, JW, Staley, DM, Stock, JD, Bawden, GW, 2011. Conditions hydrologiques et balayage laser terrestre des coulées de débris post-incendie dans les montagnes de San Gabriel, Californie, États-Unis. Revue italienne de géologie de l'ingénierie et de l'environnement. http://dx.doi.org/10.4408/IJEGE.2011-03.B-064.

Schumm, SA, 1973. Seuils géomorphiques et réponse complexe des systèmes de drainage. Dans : Morisawa, M. (éd.), Fluvial Geomorphology, volume des actes de la quatrième série annuelle de symposiums de géomorphologie tenue à Binghamton, New York, State University of New York à Binghamton, pp. 299–310.

Schumm, SA, 1979. Seuils géomorphiques : le concept et ses applications. tions de l'Institut des géographes britanniques 4, 485–515.

Schumm, SA, 1980. Quelques applications du concept de seuils géomorphiques. Dans : Coates, DR, Vitek, JD (éd.), Thresholds in Geomorphology. Allen & Unwin, Londres, pp. 473–485.

Scott, DF, van Wyk, DB, 1992. Les effets du feu sur la répulsion de l'eau du sol, les rendements des sédiments des bassins versants et l'écoulement des cours d'eau. Dans : van Wilgen, BW, Richardson, DM, Kruger, FJ, van Hesbergen, HJ (éd.), Incendies dans le fynbos des montagnes d'Afrique du Sud. Springer-Verlag, New York, pp. 216–239.

Shakesby, RA, 2011. Érosion des sols après incendies de forêt en Méditerranée : revue et orientations de recherche futures. Earth-Science Reviews 105, 71–100.

Shakesby, RA, Doerr, SH, 2006. Les feux de forêt en tant que phénomène hydrologique et géomorphologique agent. Earth-Science Reviews 74, 269–307.

Shakesby, RA, Coelho, COA, Ferreira, AD, Terry, JP, Walsh, RPD, 1993. Impacts des feux de forêt sur l'érosion des sols et l'hydrologie dans la forêt méditerranéenne humide, Portugal. International Journal of Wildland Fire 3, 95–110.

Shakesby, RA, Doerr, SH, Walsh, RPD, 2000. L'impact érosif de l'hydrophobie du sol : problèmes actuels et orientations de recherche futures. Journal of Hydrology 231–232, 178–191.

Shakesby, RA, Wallbrink, PJ, Doerr, SH, English, PM, Chafer, CJ, Humphreys, GS, Blake, WH, Tomkins, KM, 2007. Caractère distinctif des effets des feux de forêt sur l'érosion des sols dans la forêt d'eucalyptus du sud-est de l'Australie, évalué dans un contexte mondial. Forest Ecology and Management 238, 347–364.

Sheridan, GJ, Lane, PNJ, Noske, PJ, 2007. Quantification des processus d'écoulement et d'érosion des pentes avant et après un incendie de forêt dans une forêt humide d'eucalyptus. Journal of Hydrology 343, 12–28.

Sherman, LK, 1932. Débit d'eau de pluie par la méthode du graphique unitaire. Ingénierie News-Record 108, 501–505.

Shin, SS, 2010. Réponse du ruissellement et de l'érosion avec la récupération de la végétation dans les pentes différemment traitées après un incendie de forêt, Corée. 8e Symposium international sur l'écohydraulique, Séoul, Corée, septembre 2010.

Silins, U., Stone, M., Emelko, MB, Bladon, KD, 2009. Production de sédiments après un grave incendie de forêt et exploitation forestière de récupération après incendie dans les sources des Rocheuses du bassin de la rivière Oldman, en Alberta. Catena 79, 189–197.

Šimùnek, J., Šejna, M., Saito, H., Sakai, M., van Genuchten, M.Th, 2008. Le progiciel HYDRUS-1D pour simuler le mouvement de l'eau, de la chaleur et de multiples solutés dans des milieux à saturation variable, version 4.08. Série de logiciels HYDRUS, 3. Département des sciences de l'environnement, Université de Californie à Riverside, Riverside, Californie, États-Unis, p. 330 (2008).

Skamarock, WC, 2004. Évaluation des modèles NWP à mésoéchelle à l'aide de spectres d'énergie cinétique. Monthly Weather Review 132, 3019–3032.

Smart, GM, Duncon, MJ, Walsh, JM, 2002. Équations de résistance à l'écoulement relativement approximatives. Journal of Hydraulic Engineering 568–578 (juin).

Smith, RR, 1972. L'enveloppe d'infiltration : résultats d'un infiltromètre théorique. Journal d'hydrologie 17, 1–21.

Smith, RE, Goodrich, DC, 2000. Modèle pour les régimes d'excès de précipitations sur des zones aléatoirement hétérogènes. Journal of Hydrologic Engineering 5, 355–362.

Smith, RE, Parlange, J.-Y., 1978. Un modèle d'infiltration hydrologique efficace en termes de paramètres. Recherche sur les ressources en eau 14, 533–538.

Smith, MB, Koren, V., Zhang, Z., Wang, D., 1999. Approches de modélisation semi-distribuées et groupées : étude de cas de l'application des données NEXRAD aux grands bassins hydrographiques du bassin de la rivière Arkansas. Résumé. Réunion de printemps de l'American Geophysical Union, Boston. MA.

Smith, RE, Smettem, KRJ, Broadbridge, P., Woolhiser, DA, 2002. Théorie de l'infiltration pour les applications hydrologiques. Monographie des ressources en eau, 15. American Geophysical Union, Washington, DC (212 pp.).

Machine Translated by Google

Smith, MB, Koren, VI, Zhang, Z., Reed, SM, Pan, J.-J., Moreda, F., 2004. Réponse du ruissellement à la variabilité spatiale des précipitations : une analyse des données observées. Journal of Hydrology 298, 267–286.

Smith, HG, Sheridan, GJ, Lane, PNJ, Bren, LJ, 2011a. Effets des feux de forêt et de la récolte de récupération sur la production de ruissellement et les exportations de sédiments des bassins versants forestiers de pins radiata et d'eucalyptus, sud-est de l'Australie. Forest Ecology and Management 261, 570–581.

Smith, HG, Sheridan, GJ, Nyman, P., Child, DP, Lane, PNJ, Hotchkis, MAC, Jacobsen, GE, 2011b. Quantification des sources de sédiments fins fournis aux coulées de débris après incendie à l'aide de traceurs de radionucléides de retombées. Géomorphologie 139–140, 403–415.

Smith, HG, Sheridan, GJ, Land, PNJ, Noske, PJ, Heijnis, H., 2011c. Changements dans les sources de sédiments suite à un incendie de forêt dans un bassin versant boisé de hautes terres, sud-est de l'Australie. Hydrological Processes 25, 2878–2889.

Smith, HG, Blake, WH, Owens, PN, 2012. Discrimination des sources de sédiments fins et application de traceurs de sédiments dans les bassins versants brûlés : une revue. Processus hydrologiques. http://dx.doi.org/10.1002/hyp.9537.

Service de conservation des sols, 1972. Manuel national d'ingénierie, section 4, Service de conservation des sols. Département de l'agriculture des États-Unis, Washington, DC

Spigel, KM, Robichaud, PR, 2007. Taux d'érosion après incendie la première année dans la forêt nationale de Bitterroot, Montana. Hydrological Processes 21, 988–1005.

Spreen, WC, 1947. Une détermination de l'effet de la topographie sur les précipitations. Eos, Transactions Union géophysique américaine 28 (2), 285–290.

Springer, EP, Hawkins, RH, 2005. Réponses du nombre de courbes et du débit de pointe après l'incendie de Cerro Grande sur un petit bassin versant. Dans : Moglen, GE (éd.), Actes : Conférence 2005 sur la gestion des bassins versants – Gestion des bassins versants pour les impacts humains et naturels : défis techniques, écologiques et économiques : 19-22 juillet 2005. Williamsburg, VA, American Society of Civil Engineers, pp. 459-470.

Staley, DM, Wasklewicz, TA, Kean, JW, 2010. Observations de l'évolution du réseau de drainage dans un bassin versant récemment incendié à l'aide d'un balayage laser terrestre. Geophysical Research Abstracts 12, EGU2010-4849-1.

Staley, DM, Kean, JW, Cannon, SH, Schmidt, KM, Laber, JL, 2012. Définition objective des seuils d'intensité et de durée des précipitations pour le déclenchement des coulées de débris après incendie dans le sud de la Californie. Glissements de terrain. http://dx.doi.org/10.1007/s10346-012- 0341-9.

Stoof, CR, Wesseling, JG, Ritsema, CJ, 2010. Effets du feu et des cendres sur la rétention d'eau du sol. Géoderma 159, 276–285.

Stoof, CR, Moore, D., Ritsema, CJ, Dekker, LW, 2011a. Hydrofugation naturelle et induite par le feu du sol dans une zone arbustive portugaise. Soil Science Society of America Journal 75 (6), 2283–2295.

Stoof, CR, De Kort, A., Bishop, TFA, Moore, D., Wesseling, JG, Ritsema, CJ, 2011b. Comment les fragments de roche et l'humidité affectent les températures du sol pendant un incendie. Soil Science Society of America Journal 75 (3), 1133–1143.

Stoof, CR, Vervoort, RW, Iwema, J., van den Elsen, E., Ferreira, AJD, Ritsema, CJ, 2012. Réponse hydrologique d'un petit bassin versant brûlé par un feu expérimental. Hydrologie et sciences du système terrestre 16, 267–285.

Suhr, JL, Jarrett, AR, Hoover, JR, 1984. Les effets de l'emprisonnement de l'air dans le sol sur l'érosion. Transactions de l'ASABE 27, 93–98.

Sun, T., Meakin, P., Jøssang, T., 1994. Un modèle de dissipation d'énergie minimale pour les bassins versants qui différencie explicitement les réseaux de canaux et les pentes des collines. Physica A 210, 24–47.

Swanson, FJ, 1981. Incendie et processus géomorphiques. Dans : Mooney, HA, Bonnicksen, TM, Christensen, NL, et al. (éd.), Incendie et processus écosystémiques, rapport technique général WO-26 du Service des forêts du ministère de l'Agriculture des États-Unis, pp. 401–420.

Swetnam, TW, Baisan, CH, 2003. Reconstructions des cernes des arbres de l'histoire des incendies et du climat dans la Sierra Nevada et le sud-ouest des États-Unis. Dans : Veblen, TT, Baker, WL, Montenegro, G., Swetnam, TW (éd.), Fire and Climatic Change in Temperate Ecosystems of the Western Americas, chapitre 6. Springer, New York, pp. 158–195.

Swetnam, TW, Baisan, CH, Caprio, AC, Brown, PH, 1992. Historique des incendies dans une forêt de chênes et de pins mexicains et dans une forêt galerie de conifères de montagne adjacente dans le sud-est de l'Arizona. Symposium sur l'écologie et la gestion des forêts de chênes et de forêts de laine associées : perspectives dans le sud-ouest des États-Unis et le nord du Mexique. Sierra Vista, Arizona, 27-30 avril 1992, pp. 165–173.

Takahashi, T., Sawada, T., 1994. Prédiction de la charge de fond dans les rivières de montagne abruptes. Dans : Cotroneo, GV, Rumer, RR (éd.), Hydraulic Engineering '94, actes de la conférence 1994, 1er au 5 août 1994. American Society of Civil Engineers, Buffalo, New York, pp. 810–814.

Tessler, N., 2012. Documentation et analyse des régimes d'incendies de forêt sur le mont Carmel et les collines de Jérusalem. Dans : Maos, JO, Charney, I. (éd.), Numéro spécial de Horizons in Geography, 79–80, pp.

Tomkins, KM, Humphreys, GS, Gero, AF, Shakesby, RA, Doerr, SH, Wallbrink, PJ, Blake, WH, 2008. Réponse hydrologique post-incendie dans un environnement dominé par El Niño-Oscillation australe. Journal of Geophysical Research : Earth Surface 113, F02023.

Tromp-van Meerveld, HJ, McDonnell, JJ, 2006. Relations de seuil dans l'écoulement des eaux pluviales souterraines : 2. L'hypothèse du remplissage et du déversement. Water Resources Research 42, W02411. http://dx.doi.org/10.1029/2004WR003800.

Tryhorn, L., Lynh, A., Abramson, R., Parkyn, K., 2008. Mécanisme météorologique lors des crues éclair après incendie : une étude de cas. Monthly Weather Review 136, 1778–1791.

Tsuyuzaki, S., Kushida, K., Kodama, Y., 2009. Récupération de l'albédo de surface et de la couverture végétale après un incendie de forêt dans une forêt de Picea mariana dans l'intérieur de l'Alaska. Climatic Change 93, 517–525.

Turner, R., Roberts, N., Jones, MD, 2008. Rythme climatique des historiques d'incendies méditerranéens à partir de microcharbons sédimentaires lacustres. Global and Planetary Change 63, 317–324.

Ulery, AL, Graham, RC, Bowen, LH, 1996. Effets des feux de forêt sur les phyllosilicates du sol en Californie. Soil Science Society of America Journal 60 (1), 309–315.

Vaezi, AR, Bahrami, HA, Sadeghi, SHR, Mahdian, MH, 2011. Développement d'un nomo-graphe pour estimer le facteur d'érodibilité des sols calcaires dans le nord-ouest de l'Iran. Journal international de géologie 4 (5), 93–99.

van Dine, D., Rodman, R., Jordan, P., Dupas, J., 2005. Kuskonook Creek, un exemple de analyse des coulées de débris. Glissements de terrain 2 (4), 257–265.

van Rompaey, AJJ, Vieillefont, V., Jones, RJA, Montanarella, L., Verstraeten, G., Bazzoffi, P., Dostal, T., Krasa, J., deVente, J., Poesen, J., 2003. Validation des estimations de l'érosion des sols à l'échelle européenne. Rapport de recherche du Bureau européen des sols n° 13, EUR 20827 EN. Office des publications officielles des Communautés européennes, Luxembourg (26 p.). van Wagtendonk, JW, Root, RR, Key, CH, 2004.

Comparaison des capacités de détection d'AVIRIS et de Landsat ETM+ pour la gravité des brûlures. Remote Sensing of Environment 92, 397–408.

Vannière, B., Colombaroli, D., Chapron, E., Leroux, A., Tinner, W., Magny, M., 2008. Régimes d'incendies d'origine climatique et anthropique dans les paysages méditerranéens : l'enregistrement holocène du Lago dell'Accesa (Toscane, Italie). Quaternary Science Reviews 27, 1181–1196.

Veblen, TT, Kitzberger, T., Donnegan, J., 2000. Influences climatiques et humaines sur les régimes d'incendies dans les forêts de pins ponderosa du Front Range du Colorado. Applications écologiques 10, 1178–1195.

Veblen, TT, Baker, WL, Montenegro, G., Swetnam, TW, 2003. Incendies et changements climatiques dans les écosystèmes de température des Amériques occidentales. Springer-Verlag, New York (444 pp.).

Venugopal, V., Foufoula-Georgiou, E., Sapozhnikov, V., 1999. Preuves d'une mise à l'échelle dynamique des précipitations spatio-temporelles. Journal of Geophysical Research 104 (D24), 31599–31610.

Vivoni, ER, Tai, K., Gochis, DJ, 2009. Effets de l'humidité initiale du sol sur la génération de précipitations et la réponse hydrologique ultérieure pendant la mousson nord-américaine. Journal d'hydrométéorologie 10, 644–664.

Wagenbrenner, JW, MacDonald, LH, Rough, D., 2006. Efficacité de trois traitements de réhabilitation après incendie dans le Colorado Front Range. Hydrological Processes 20, 2989–3006.

Wagenbrenner, JW, Robichaud, PR, Elliot, WJ, 2010. Érosion en rigoles dans les forêts naturelles et perturbées : 2. Approches de modélisation. Water Resources Research 46, W10507. http://dx.doi.org/10.1029/2009WR008315 (12 pp.).

Wainwright, J., Parsons, AJ, 2002. L'effet des variations temporelles des précipitations sur la dépendance d'échelle des coefficients de ruissellement. Water Resources Research 38 (12), 7-1–7-10. http://dx.doi.org/10.1029/2000WR000188.

Wang, Z., Feyen, J., Nielsen, DR, van Genuchten, MT, 1997. Équations d'infiltration à écoulement diphasique tenant compte des effets de piégeage de l'air. Water Resources Research 33, 2759–2767.

Wang, Z., Feyen, J., van Genuchten, MT, Nielsen, DR, 1998. Effets de l'emprisonnement d'air sur le taux d'infiltration et l'instabilité de l'écoulement. Water Resources Research 34, 213–222.

Weber, WA, 1976. Rocky Mountain Flora, 5e édition. Presses universitaires du Colorado, Niwot, Colorado (479 pp.).

Wells II, WG, 1987. Les effets du feu sur la génération de coulées de débris dans le sud de la Californie. Dans : Costa, JE (éd.), Debris Flow/Avalanches: Process, Recognition, and Mitigation, Reviews in Engineering Geology, III, pp.

Wendt, CK, Beringer, J., Tapper, NJ, Hutley, LB, 2007. Développement de la couche limite locale sur la savane tropicale brûlée et non brûlée : une étude observationnelle. Boundary-Layer Meteorology 124 (2), 291–304.

Westerling, AL, Gerchunov, A., Brown, TJ, Cayan, DR, Dettinger, MD, 2003. Climat et feux de forêt dans l'ouest des États-Unis. Bulletin de l'American Meteorological Society 84 (5), 595–604.

Westerling, AL, Turner, MG, Smithwick, EAH, Romme, WH, Ryan, MG, 2011. Le réchauffement continu pourrait transformer les régimes d'incendies du Grand Yellowstone d'ici le milieu du 21e siècle. Proceedings of the National Academy of Sciences 108 (32), 13165–13170.

Western, AW, Blöschl, G., Grayson, RB, 2001. Vers la capture de la connectivité hydrologiquement significative dans les schémas spatiaux. Water Resources Research 37 (1), 83–97.

White, I., Sully, MJ, 1987. Longueur capillaire macroscopique et microscopique et échelles de temps à partir de l'infiltration sur le terrain. Water Resources Research 23 (8), 1514–1522.

Whitlock, C., Marlon, J., Briles, C., Brunelle, A., Long, C., Bartleir, PJ, 2008. Relations à long terme entre le feu, le combustible et le climat dans le nord-ouest des États-Unis d'après des études sur les sédiments lacustres. International Journal of Wildland Fire 17, 72–83.

Whitlock, C., Higuera, PE, McWethy, DB, Briles, CE, 2010a. Perspectives paléoécologiques sur l'écologie du feu : revisiter le concept de régime du feu. The Open Ecology Journal 3, 6–23.

Whitlock, C., Tinner, W., Newman, L., Kiefer, T., 2010b. Le feu dans le système terrestre : une paléopective. Pages News 18 (2), 55–95.

Wiberg, PL, Smith, JD, 1987. Calculs de la contrainte de cisaillement critique pour le mouvement des sédiments uniformes et hétérogènes. Water Resources Research 23, 1471–1480.

Williams, AG, Moody, JA, 2003. Caractéristiques historiques des précipitations sur la zone brûlée de Hayman. Rapport pour le Colorado Water Science Center (17 pp.).

Winchell, M., Gupta, HV, Sorooshian, S., 1998. Sur la simulation de l'écoulement par infiltration et saturation en excès à l'aide d'estimations de précipitations par radar : effets de l'incertitude de l'algorithme et de l'agrégation de pixels. Water Resources Research 34 (10), 2655–2670.

Wischmeier, WH, Smith, DD, 1978. Prévision des pertes dues à l'érosion pluviale : guide de planification de la conservation. Manuel agricole n° 537. Département de l'agriculture des États-Unis, Washington DC, pp. 13–27.

Wischmeier, WH, Johnson, CB, Cross, BV, 1971. Nomogramme d'érodabilité des sols pour les terres agricoles et les sites de construction. Journal of Soil and Water Conservation 26, 189–193.

Wohl, EE, 2010. Mountain Rivers Revisited, Monographie des ressources en eau, 19. Américain Union géophysique (573 pp.).

Wohlgemuth, PM, Hubbert, KR, 2008. Les effets du feu sur les propriétés hydrologiques du sol et les flux de sédiments dans les zones escarpées du chaparral. Californie du Sud, Riverside, CA, US Department of Agriculture, Forest Service, General. Rapport technique PSW-GTR-189. 115–122.

Machine Translated by Google

Wondzell, SM, King, JG, 2003. Processus d'érosion post-incendie dans les régions du nord-ouest du Pacifique et des montagnes Rocheuses. Forest Ecology and Management 178, 75–87.
Woods, SW, Balfour, VN, 2008. L'effet des cendres sur le ruissellement et l'érosion après un grave incendie de forêt, Montana, États-Unis. International Journal of Wildland Fire 17, 535–548.
Woods, SW, Balfour, VN, 2010. L'effet de la texture du sol et de l'épaisseur des cendres sur la réponse hydrologique après incendie des sols recouverts de cendres. Journal of Hydrology 393, 274–286.
Woods, SW, Birkas, A., Ahl, R., 2007. Variabilité spatiale de l'hydrophobicité du sol après les incendies de forêt dans le Montana et le Colorado. Géomorphologie 86, 465–479.
Wu, W., Geller, MA, Dickinson, RE, 2002. La réponse de l'humidité du sol à la variabilité à long terme des précipitations. Journal of Hydrometeorology 3 (5), 604–613.
Xue, J., Gavin, K., 2008. Effet de l'intensité des précipitations sur l'infiltration dans les sols partiellement saturés pentes. Géotechnique Génie Géologique 26, 199–209.
Yair, A., Raz-Yassif, N., 2004. Processus hydrologiques dans un petit bassin versant aride : effets d'échelle des précipitations et de la longueur des pentes. Géomorphologie 61, 155–169.
Yang, CT, 2006. Transport de sédiments non cohésifs. Manuel d'érosion et de sédimentation, ministère de l'Intérieur des États-Unis, Bureau of Reclamation, chapitre 3. 1–104.
Yates, DN, Warner, TT, Leavesley, GH, 2000. Prévision d'une crue éclair en terrain complexe. Partie II : Comparaison des simulations de débit de crue à l'aide d'entrées de précipitations provenant d'un radar, d'un modèle dynamique et d'un système algorithmique automatisé. Journal of Applied Meteorology 39, 815–825.
Yu, B., Rose, CW, Coughlan, KJ, Fentie, B., 1997. Caractéristiques et modélisation des précipitations et du ruissellement à l'échelle de la parcelle sur six sites en Australie et en Asie du Sud-Est. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers 40 (5), 1295–1303.